

Etude des dégradations et reconditionnement d'une semelle romaine cloutée en cuir traitée par PEG 400

Mémoire présenté par :

Pedersen Line

Pour l'obtention du

Bachelor of Arts HES-SO en Conservation
Objets archéologiques et ethnographiques

Année académique 2015-2016

Remise du travail : 25.07.2016

Jury : 29.08.2016

Nombre de pages (avec annexes) : 91

Engagement

« J'atteste que ce travail est le résultat de ma propre création et qu'il n'a été présenté à aucun autre jury que ce soit en partie ou entièrement. J'atteste également que dans ce texte toute affirmation qui n'est pas le fruit de ma réflexion personnelle est attribuée à sa source et que tout passage recopié d'une autre source est en outre placé entre guillemets. »

Date et signature :

Remerciements

Par ces quelques lignes je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes sans qui ce travail n'aurait pu aboutir :

A **Myriam Krieg**, **Laura Andrey** et **Sandra Gillioz** conservatrices restauratrices au Site et Musée romains d'Avenches pour m'avoir proposé ce sujet et m'avoir encadré. Je n'aurais pu rêver meilleur sujet et meilleur endroit pour clôturer ce bachelor ! Merci !

A **Marquita Volken**, calcéologue et archéologue à Gentle Craft, Lausanne, pour m'avoir accueilli chaleureusement dans son petit mais non moins passionnant musée durant une matinée, avoir répondu à mes questions et s'être intéressée à mon sujet.

A **Céline Bonnot-Diconne**, conservatrice-restauratrice, Maître d'art et responsable du 2CRC - Centre de Conservation et de Restauration du Cuir, pour avoir pris le temps de répondre à mes questions le temps d'un appel téléphonique et m'avoir fait partager son savoir sans retenue.

A **Johanna Klügl**, conservatrice-restauratrice au service archéologique de Berne, pour avoir répondu à mes questions avec gentillesse et générosité.

Merci aussi à **David Cuendet**, conservateur-restaurateur et responsable au Musée Cantonal d'Archéologie et d'Histoire de Lausanne pour m'avoir accueilli le temps d'un entretien et pour avoir partagé ces connaissances avec une grande gentillesse.

A **Christian Cevey** et **Joëlle Bregniard Munier**, conservateurs-restaurateurs au Laténium, pour la réponse à mes questions et m'avoir transmis les informations sur les traitements effectués sur cette passionnante semelle !

Merci au corps enseignant de la Haute Ecole Arc CR, **Dr Régis Bertholon**, **Valentin Boissonnas**, **Thierry Jacot** et **Tobias Schenkel** pour nous avoir encadré durant ce travail de bachelor et pour nous avoir transmis leur savoir durant ces trois dernière années.

Merci à **Laura Brambilla**, pour les analyses IRTF, les heures à interpréter les spectres et l'intérêt porté à mon travail.

Merci aux **copains de la volée 2013-2016** pour les rires, les soupers, les dessins sur les tableaux pour décompresser, les imitations multiples et variées, les encouragements, l'entraide et toutes les discussions de chats et de nourriture pendant et entre les pauses.

Merci encore à **mes deux coloc's** pour les discussions, les nombreux débats, les rires dans la cuisine, les prises de tête pour la vaisselle et les conseils vestimentaires.

Enfin, un grand merci à **mes proches** pour avoir compris quand je devais travailler, m'avoir soutenue et avoir toujours été fière de moi quoi qu'il arrive.

Table des matières

Remerciements.....	1
Table des matières	2
Résumé.....	4
Abstract.....	5
Introduction	6
1. Une semelle romaine cloutée comme on en trouve peu en Suisse.....	8
1.1. Contexte de découverte	8
1.2. Description de la semelle.....	10
1.3. Technologie et marques de fabrication.....	12
1.4. Usage et fonction des chaussures	15
1.5. Identification des valeurs culturelles associées.....	16
2. Conservation-restauration des cuirs archéologiques gorgés d'eau	17
2.1. Aperçu des particularités physico-chimiques liées à l'enfouissement	17
2.2. Conservation post-fouille	18
2.2.1. Imprégnation au PEG 400 et séchage par lyophilisation	19
2.2.2. Conditions de conservation actuelles.....	20
3. Constat d'état des altérations	20
3.1. Méthodologie et analyses employées	20
3.2. Description des altérations et localisation	21
3.2.1. Fragmentations et fissures	21
3.2.2. Traces d'usures	22
3.2.3. Cohésion et friabilité du cuir	22
3.2.4. Dépôts divers	23
3.2.5. Faciès de corrosion des clous	24
3.2.6. Description stratigraphique et caractérisation des produits de corrosion	28
3.3. Diagnostic	34
3.3.1. Interaction du cuir et des clous	34
3.3.2. Usage	34
3.3.3. Enfouissement et mise au jour	35
3.3.4. Vieillissement du PEG 400	38
3.3.5. Manipulation et conservation post-fouille.....	40
3.4. Pronostic et propositions d'intervention	41
4. Reconditionnement	42
4.1. Objectifs du nouveau conditionnement.....	42

4.2.	Transfert de la semelle.....	42
4.3.	Support pour le long terme en composite époxy/fibres de verre	43
4.4.	Réalisation du support	45
4.5.	Recommandations de manipulation.....	47
5.	Recommandations climatiques de conservation	48
6.	Discussion	51
	Conclusion générale.....	52
	Liste des références bibliographiques	53
	Liste des communications orales et écrites	58
	Glossaire.....	59
	Liste des figures	60
	Liste des tableaux.....	62
	Annexes.....	63
	Annexe 1 : Présentation de l'objet	63
	Structure du derme.....	68
	Annexe 2 : Rapports de travail.....	69
	Annexe 3 : Détail et procédure des analyses.....	71
	Protocole d'analyse par IRTF	71
	Protocole de mesure du pH par micro-échantillonnage	73
	Annexe 4 : Documentation des altérations.....	75
	Référentiel pour le test de friabilité	75
	Photographies des altérations.....	76
	Annexe 5 : Propositions d'interventions	78
	Annexe 6 : Reconditionnement	79
	Protocole de consolidation.....	79
	Comparaison de conditionnements	79
	Propriétés des matériaux utilisés.....	81
	Etapes de la réalisation du laminé époxy/fibres de verre	82
	Protocole de transfert	86
	Détails des matériaux et fournisseurs.....	87
	Annexe 7 : Synthèse des entretiens et des échange de courriel	89

Résumé

Ce travail a pour objet l'étude d'une semelle romaine cloutée en cuir découverte en 1990 dans les couches de comblements du canal navigable de la ville antique d'*Aventicum* (Avenches). Traitée par PEG 400 et lyophilisation, puis conditionnée sur une mousse polyuréthane (PUR) plâtrée, la semelle présente aujourd'hui des dégradations nous ayant amenés à reconsidérer les modes de sa conservation.

Au travers d'un examen diagnostique soutenu par des moyens analytiques et avec l'aide de spécialistes, nous avons pu mettre en lumière les traces technologiques présentes sur cette semelle et décrire son état. Les altérations sont des conséquences de l'enfouissement, de la mise au jour, de la conservation et de la manipulation de l'objet. Si le cuir semble stable et permet, de par son bon état, la lecture de certaines informations typologiques et technologiques inédites pour cet objet, les clous présentent une corrosion active avec présence de chlorures (exsudats et akaganéite β -FeOOH) entraînant une perte matérielle des clous et une altération du cuir en provoquant dépôts et fissures.

Suite au constat d'état, la semelle a été déplacée de son ancien conditionnement et un nouveau support a été élaboré. L'état mécanique du cuir ainsi que le caractère indissociable des clous a nécessité un conditionnement qui respecte au plus près les formes de l'objet et a demandé la mise en place d'un support de transfert permettant la manipulation sans toucher directement à la semelle. Un matelas en bourre de polyester a permis un transfert efficace de la semelle et n'a pas induit de dommages. Nous avons pu ainsi documenter le côté en contact avec la mousse PUR dont nous ne connaissions pas l'état.

Grâce à des retours d'expériences provenant de divers professionnels en conservation-restauration des objets organiques archéologiques, nous avons exploré quelques possibilités de conditionnement. Notre attention s'est portée sur un concept de composite de fibres de verre et d'époxy. Ce dernier a été choisi car sa mise en forme par moulage permet d'épouser les formes d'une surface. Le résultat obtenu permet d'assurer une meilleure conservation de l'objet par son maintien mécanique, sa compatibilité physico-chimique avec les clous et le cuir ainsi que sa stabilité dans le temps.

Concernant le climat, la présence d'akaganéite (β -FeOOH) nécessite une atmosphère sèche (12% d'humidité relative) pour limiter sa formation. Ces taux pouvant altérer fortement le cuir, nous proposons de placer la semelle dans une atmosphère dont le taux d'humidité relative se situe entre 35 et 40%. Dans le prolongement de ce travail, nous mettrons aussi en place un conditionnement sous vide partiel d'oxygène afin de limiter la dégradation du cuir et des clous.

Enfin, nous recommandons une surveillance régulière de l'état des clous et du cuir afin d'évaluer l'efficacité des mesures prises.

Abstract

The aim of this work is to study a roman leather shoe sole with iron nails. It was excavated in 1990 from a navigable canal located near the antique city of *Aventicum* (Avenches). After the excavation, it was treated with PEG 400 and freeze-drying, and packed in a polyurethane (PUR) foam with plaster. Since, some deteriorations have occurred, which leads us to reassess the conservation conditions.

With the help of specialists and analytic methods, new technological marks were discovered on the sole and its deteriorations were described. The deteriorations are the result of burying, excavation, conservation and handling. If the leather appears stable, the nails are not: it shows active corrosion with the presence of akaganeite (β -FeOOH) and weeping iron causes a loss of material and a deterioration of the leather.

Following the description of the condition, the sole was removed from the PUR foam and put in a new holder. The mechanical condition of the sole and the presence of the nails led us to use an adjusted holder and required to move the sole with a transfer medium. This stage required to consolidate the leather and the nails. The transfer medium used here allowed us to keep the sole safe. Moreover, it has given us access to the flesh side of the sole that we could not see before due to the PUR foam.

With the support of experienced professionals in conservation-restoration of archaeological organics objects, we have explored some possibilities of packaging. We focused on a concept of laminated glass fibres impregnated with epoxy resin. The result ensures a better conservation of the object thanks to mechanical support and physicochemical compatibility.

About the climatic control, akaganeite (β -FeOOH) and weeping need a dry climate storage (above 12%) in order not to appear. However, these values are not tolerated by the leather, so we proposed to put the leather under relative humidity of about 35-40%.

Furthermore, after this work, we will prepare an anoxic micro-environment packaging in order to limit the deterioration of both leather and iron.

Finally, we advise to check regularly the condition of the sole to ensure that the new conditions of conservation are efficient.

Introduction

A l'époque romaine, le cuir est omniprésent et toutes sortes d'objets plus ou moins complexes sont ainsi façonnés avec adresse (chaussures, tentes, vêtements). Mais le cuir est fragile en contexte archéologique et se conserve moins bien que d'autres matériaux (métal, céramique, matériel lithique). Les trouvailles sont donc rares et souvent lacunaires, rendant leur interprétation difficile. Seul des contextes particuliers permettent sa conservation et la conservation post-fouille nécessite un soin particulier.

En 1990, au lieu-dit « D'En-Chaplix » situé dans la commune d'Avenches, une semelle romaine en cuir clouté quasiment complète a été découverte dans les couches de comblements d'un canal. Gorgée d'eau, elle a été préservée grâce à des traitements particuliers pour ce type d'objet (PEG 400 et lyophilisation). Afin de garantir la bonne conservation de la semelle, le traitement de stabilisation a été suivi d'un conditionnement sur une mousse orthopédique plâtrée. Ce dernier devait être provisoire et l'on présume que c'est une mousse polyuréthane (PUR). Conservée au Site et Musée romains d'Avenches (SMRA) depuis son traitement, la semelle a été gardée dans une réserve pour les matériaux organiques dont l'humidité relative avoisine les 50-55%.

Lorsque des pièces métalliques indissociables sont présentes sur le cuir, les altérations spécifiques du cuir et du fer et leur sensibilité presque opposée les rendent particulièrement compliqués à traiter. Dans la plupart des cas un choix doit être fait dans une optique de moindre mal. Au vu de la rareté du cuir, ce dernier a été privilégié jusqu'à présent.

Mais depuis sa découverte et sa stabilisation, différents problèmes sont apparus. Le support en lui-même est devenu cassant et s'émiette. Il n'assure donc plus la bonne conservation de la semelle. Pour ce qui est de la semelle, certains clous présentent un éclatement, des fissures et une corrosion orangée-jaune et le cuir se fragmente par endroits. Ces observations actuelles inhérentes à l'état de l'objet tendent à émettre que la semelle est en processus de dégradation et que le conditionnement doit être changé et les conditions de conservation climatiques réévaluées.

Un travail de mémoire étant l'occasion de se plonger dans un sujet, sous la tutelle de Myriam Krieg, conservatrice au SMRA, l'objectif de ce travail de Bachelor consiste à établir un examen diagnostique de la semelle afin d'en évaluer l'état et de proposer des nouvelles mesures de conservation.

Pour y aboutir, il se divise en plusieurs parties dont la première répondra à des questions concernant l'observation de la semelle en l'état, soit : quelles sont les informations socio-culturelles et technologiques dont est porteuse la semelle ? Quelles sont ses valeurs culturelles ? Quels traitements de conservation ont été exactement effectués ? En quoi consistent-ils ? Quel est l'état actuel de la semelle et comment cet état influence-t-il les valeurs culturelles ? Quelles actions peuvent être mises en place pour préserver ses valeurs culturelles ?

La deuxième partie présentera les nouvelles mesures de conservation, soit : le nouveau mode de conditionnement et les matériaux que nous avons choisi ainsi que des recommandations climatiques en fonction des observations faites.

1. Une semelle romaine cloutée comme on en trouve peu en Suisse

En Europe, les objets en cuir provenant de contexte archéologique sont principalement conservés dans des milieux humides (lacustre, marin, marécage, tourbière) ou glaciers¹. Les milieux archéologiques permettant ces conditions spécifiques se retrouvent particulièrement dans le nord de l'Europe, ce n'est donc pas un hasard si c'est dans ces lieux que les découvertes de cuirs archéologiques sont les plus opulentes².

En Suisse, les découvertes de cuirs archéologiques sont peu courantes. Le camp militaire romain de Vindonissa situé dans le canton d'Argovie et jouxtant la commune de Windisch est l'un des sites ayant fourni la plus grande quantité de cuir romain en Suisse. Cependant, la majeure partie des trouvailles sont des fragments de tente et non pas des semelles³.

Des fragments de chaussures ont été retrouvés dans quelques sites en Suisse et des empreintes formées par le cloutage restant ont été prélevées⁴. Mais peu de semelles présentent un état de conservation où clous et cuir sont encore associés et dont la lecture de la forme et des motifs est encore possible. La semelle d'Avenches est donc un cas relativement rare sous nos latitudes helvétiques.

1.1. Contexte de découverte

Située dans la partie nord du canton de Vaud sur le plateau suisse, la commune d'Avenches est un haut lieu de l'archéologie suisse. Capitale helvète durant la période romaine, *Aventicum*, dont le nom est dérivé de la déesse protectrice celte *Aventia*, abritait une population estimée à environ 20'000 personnes au 1^{er} siècle apr.J.-C. Bien que la datation précise de sa fondation n'ait pu être établie, des vestiges attestent cependant d'une occupation celte dès le 1^{er} siècle av.J.-C.⁵

Dès le 2^e siècle apr. J.-C, près de 60 quartiers sont délimités et aménagés dans la ville à la manière romaine. La ville possédait alors un forum, plusieurs établissements de bains publics (thermes) et au moins 8 temples. Aux abords de la ville, plusieurs cimetières sont installés⁶. En 71/72 apr.J.-C, sous le règne de l'Empereur Vespasien, débute la construction d'un mur d'enceinte de 5.5 km ceignant 228 hectares de territoires⁷.

¹ Volken, 2005, p.29.

² Ibid., p.29.

³ Ibid., p.2.

⁴ Cuendet, 2016 [communication orale] et Volken, 2016 [communication orale]

⁵ *Aventicum*, [En ligne].

⁶ Ibid.

⁷ Ibid.



Fig. 1 : reconstitution de la ville d'Aventicum (en haut) et du canal menant au lac de Morat (en bas) ©Aventicum-SMRA.



Fig. 2 : reconstitution du secteur amont du canal ©Aventicum-SMRA.

Située à quelques kilomètres du lac de Morat (Fig.1, p.9), la ville d'Aventicum est au cœur d'un réseau de voies navigables lui donnant accès aux lacs de Neuchâtel et de Bienne. En outre, c'est grâce à ces cours d'eau que seront acheminées les pierres calcaires d'Hauterive (NE) servant à la construction des nombreux édifices publics et privés de la ville⁸.

Vers 125 apr. J.-C est construit un canal navigable entre le port de rive du lac de Morat et la voie romaine du Nord-Est (Fig.2, p.9). Après des travaux réguliers dont bénéficiera l'ouvrage, celui-ci sera progressivement abandonné au cours du 2^e siècle apr.J.-C⁹.

A la fin des années 1980, à l'extrémité amont du canal, au lieu-dit « D'En Chaplix », la construction de l'autoroute A1 Yverdon-Morat motivera des fouilles permettant l'excavation et la découverte du secteur d'activité de la sortie de la porte Nord-Est du mur d'enceinte (cf annexe 1, fig. 50, p.63)¹⁰. C'est lors de l'été 1990 que la semelle fut découverte dans les couches de comblement du canal (Fig.3-4, p.10).

Outre la semelle, le comblement livrera toute sorte de déchets domestiques et artisanaux (céramique, métal, ossements d'animaux, terre cuite, etc.) dont des objets organiques, principalement en bois. On y trouvera également une autre semelle en bois¹¹.

⁸ Castella, 2015, p.113.

⁹ Ibid., p.115.

¹⁰ Aventicum, [En ligne] et Castella, 2016 [communication écrite].

¹¹ Castella, 2016 [communication écrite].



Figure 3 : fouille en cours du canal navigable (1990)
©Aventicum-SMRA.



Figure 4 : vue de la semelle lors de sa découverte
©Aventicum-SMRA

1.2. Description de la semelle

La semelle cloutée faisant l'objet de ce travail est constituée d'une pièce de cuir dont la forme de contour du pied est reconnaissable. C'est pourquoi nous utiliserons un vocabulaire faisant référence au pied pour parler des différentes parties de la semelle (cf annexe 1, fig. 51, p.64). Elle est constituée de deux faces, une externe au contact du sol correspondant au côté fleur du cuir et une interne au contact du pied correspondant au côté chair du cuir (Fig. 5-7, p.10-11). Sur le côté fleur, le cuir est de couleur brune avec des nuances de gris clair. Au niveau de la tranche et du côté chair de la semelle, le brun est plus foncé, presque noir. Le cuir présente un aspect sec au toucher.



Fig. 5: face externe correspondant au côté fleur du cuir et dimensions principales.



Fig. 6: vue de côté de la tranche avec dimension maximale et minimale de l'épaisseur.



Fig. 7: face interne correspondant au côté chair du cuir.

Ainsi, la pointe du pied est fine, puis s'élargit à l'articulation pour redevenir plus fine au niveau de la voûte plantaire et s'élargit à nouveau pour former le talon. Une rangée de clous en alliage ferreux parcourt le pourtour de la semelle et deux autres forment des motifs au centre. Vers la pointe du pied, le motif trace une volute faisant penser à une forme stylisée de feuille et, au niveau du talon, à un signe de vénus avec un point au centre. Ces motifs sont similaires à d'autres, relevés sur des semelles aux Pays-Bas (cf annexe 1, fig. 53 -54, p.65-66). La forme de la semelle indique que celle-ci était destinée à un pied gauche.

Bien que la forme de la semelle et des motifs formés par les clous soient encore lisibles, elle est partiellement lacunaire. On relève en effet un fragment de cuir manquant au niveau de la pointe ainsi qu'au niveau du talon.

Le nombre de clous actuels s'élève à 103 (cf annexe 1, Fig.52, p.63). Pour décrire les clous nous utiliserons la typologie du clou de chaussure établie d'après une étude effectuée sur un corpus du site de

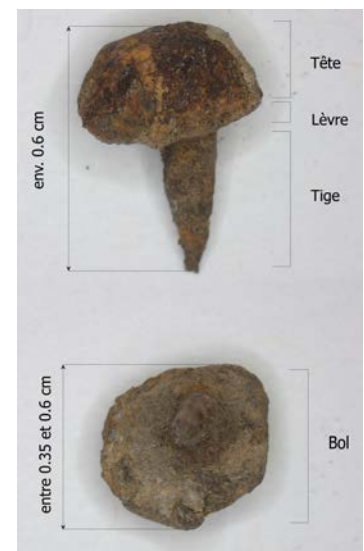


Fig. 8 : dénominations de quelques parties et dimensions moyenne pour les clous.

Pfyngut/Finges en Valais¹². Les différentes parties des clous peuvent donc être définies comme suit (Fig.8, p.11) :

- Le clou a deux parties principales : la tête et la tige.
- La face extérieure de la tête est décrite par sa forme, qui est ici conique.
- La face intérieure, où se trouve la tige, se nomme le bol.
- Le diamètre extérieur de la tête est la lèvre.
- Les traces de martelage sur l'extérieur sont appelées facettes.

1.3. Technologie et marques de fabrication

Le semelage

Les semelles des chaussures romaines en cuir se présentent sous différentes formes. Outre le cuir, on trouve pour l'époque romaine des sandales en bois ou en fibres végétales, mais le cuir reste la matière idéale pour la fabrication des chaussures¹³. Parfois la semelle est intégrée directement au patron de découpe, tandis que d'autres fois une semelle de marche est ajoutée par cloutage (Fig.9, p.12)¹⁴. Lorsque le semelage est ajouté, il peut être constitué de deux à plusieurs couches superposées (Fig.10, p.12). Une première partie intérieure fait face au pied, une seconde couche intermédiaire fait partie de l'habillage qui recouvre le pied et enfin, une troisième partie extérieure se trouve au contact du sol¹⁵.

Fig. 9 : trois types de semelage © Volken, 2005, p.37. :

1. Semelle intégrale sans cloutage
2. Semelle intégrale avec semelle d'usure ajoutée par cloutage
3. Semelle intégrale avec semelle première et semelle d'usure ajoutée par cloutage

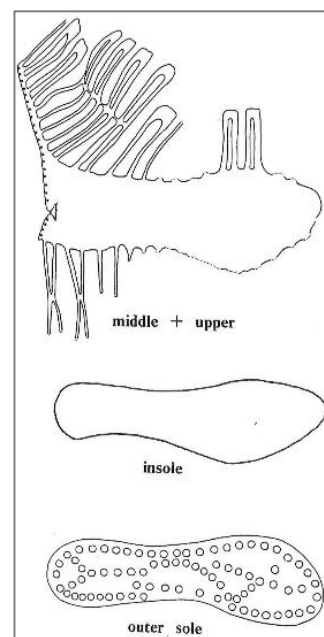
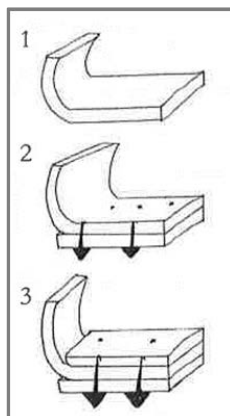


Fig. 10 : vue des différentes parties d'une chaussure avec semelage de type 3. © Leguilloux, 2004, p.122.

¹² Volken, 2011, p.324.

¹³ Volken, 2005, p.32.

¹⁴ Ibid, p.37.

¹⁵ Ibid, p.37.

Dans notre cas, il reste la semelle extérieure ainsi que quelques morceaux d'une semelle intermédiaire sur le côté chair (Fig.11, p.13). Les morceaux de cette dernière sont reconnaissables car ils apparaissent en couches dissociables.

Lors du processus de tannage*¹⁶, certaines couches de la peau sont enlevées (hypoderme et épiderme) pour ne laisser que le derme. Comme nous l'avons vu sur cette semelle, le côté chair du cuir, qui correspond à l'interface derme-hypoderme, se situe côté pied et le côté fleur, qui correspond à l'interface derme-épiderme, est placé côté sol (cf annexe 1, p.68).



Fig. 11 : morceau présumé de semelle intermédiaire (en blanc)

Le cuir utilisé pour la semelle extérieure est constitué de cuir de vache adulte ou de bœuf, plus épais et rigide que celui de la semelle intérieure et de l'habillage de la chaussure. Il est tanné selon un tannage végétal*, plus robuste que le tannage à l'alun* également employé à cette époque pour les cuirs¹⁷. Cela explique la récurrence des trouvailles de semelles extérieures, qui sont plus robustes et se conservent mieux que les autres éléments de la chaussure¹⁸.

Sur le bord avant de la semelle, se situe des trous à espacement régulier, dont la forme caractéristique permet de les associer à un assemblage par lanière cousue en serpentine* (fig.12-13, p.14)¹⁹. Ce type d'assemblage n'est pas courant pour les semelles cloutées, c'est donc probablement une réparation ou une consolidation ultérieure au montage d'origine²⁰.

¹⁶ Les termes désignés par un astérisque sont défini dans le glossaire, p.59.

¹⁷ Le tannage à l'alun était utilisé pour des cuirs plus fins et présentait une sensibilité à l'hydrolyse qui fait que l'on n'en retrouve pas dans les milieux humides, mais plutôt dans les milieux arides et secs ainsi que glaciers (Chahine, 2013, p.124-125).

¹⁸ Volken, 2016 [communication orale].

¹⁹ Ibid.

²⁰ Ibid.

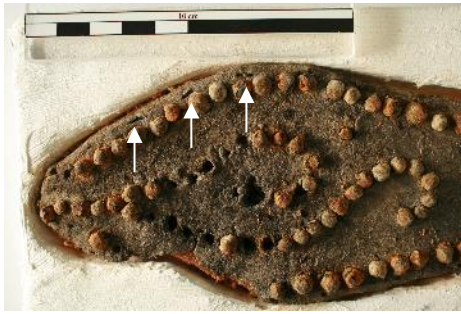


Fig. 12 : vue des trous à espacement régulier sous lumière rasante (en blanc).



Fig. 13 : trou de couture en serpentine (x 0.17) (en blanc).

Le cloutage

Concernant le cloutage, il possède une triple fonction. Il permet de maintenir les couches de la semelle ensemble, tout en protégeant le cuir de l'usure et en donnant à la semelle un relief permettant une plus grande adhérence au sol²¹.

Les couches de la semelle sont assemblées en enfonçant les clous à travers les trois épaisseurs, contre une enclume-pied*, pour que la pointe se recourbe, tel un hameçon (Fig.14, p.15)²². La pointe recourbée est donc en contact avec le pied, mais ajustée pour ne pas le blesser. Cette pointe recourbée induit que la plupart des clous ne peuvent être dissociés de la semelle.

Pour assurer l'efficacité de cette technique, les clous doivent avoir une tige de section carrée. Le but étant que la pointe se recourbe une fois l'épaisseur du cuir traversée (Fig.15, p.15). Si la section était pointue, celle-ci aurait tendance à se tasser et ne prendrait pas la forme d'hameçon nécessaire au maintien mécanique de l'assemblage des pièces de cuir²³.

Pour obtenir un clou tel que ceux que nous observons ici, les clous sont forgés en T puis placés dans une clouoire*. Les deux épaules du T sont ensuite aplaties pour leur donner la forme de la tête, formant ainsi le bol qui porte parfois encore les marques de la clouoire utilisée (sous forme de traits ou de globules)²⁴. L'absence de telles marques sur les clous de la semelle d'Avenches permet d'affirmer qu'ils sont du style le plus courant²⁵.

²¹ Volken, 2011, p.315.

²² Ibid, p.316.

²³ Ibid, p.316.

²⁴ Volken, 2011, p.316. et Artefacts, 2014 [En ligne].

²⁵ Artefacts, 2014 [En ligne].



Fig. 14: dessin d'après une stèle funéraire : un cordonnier enfonce les clous dans la semelle placée sur l'enclume pied. La semelle est maintenue sur l'enclume par une sangle que le cordonnier tend avec son pied © Volken, 2007, p.420.



Fig. 15: la section carrée de la tige ainsi que la forme recourbée en hameçon sont visibles sur la tige de ce clou (x 0.37).

1.4. Usage et fonction des chaussures

Parmi les objets en cuir romain, les chaussures ont une importance particulière car L'Empire romain est immense et beaucoup de déplacements se font à pied²⁶.

Les cordonniers romains avaient donc développé un savoir technique répondant aux critères fonctionnels, mais conservaient un savoir-faire esthétique correspondant aux modes du moment. Des planches présentant différents types de chaussures permettent de se faire une idée de la variété des modèles et des décors (cf annexe 1, fig. 55, p.67)²⁷. Il semble d'ailleurs que les chaussures cloutées étaient portées indifféremment par les militaires et les civils²⁸. Dans notre cas, il n'a pas été possible de définir l'usage de la chaussure dont fait partie cette semelle²⁹.

Concernant la durée de vie des chaussures, les données sont encore peu précises. L'archéologie expérimentale estime une durée de vie plutôt courte, comprise entre six mois pour des sandales à semelage simple et une année pour des semelages cloutés³⁰.

²⁶ Volken, 2005, p.32.

²⁷ Ibid, p.33 et Leguilloux, 2004, p.108-109.

²⁸ Volken, 2011, p.316.

²⁹ Volken, 2016 [communication orale].

³⁰ Volken, 2005, p.32.

Outre l'aspect purement pratique et esthétique, on prête également aux chaussures romaines un rôle symbolique. Certaines découvertes portent en effet à penser que les chaussures étaient utilisées comme *ex-voto*³¹. Dans le cas de la semelle d'Avenches, on peut se poser la question d'une telle pratique, car certaines chaussures trouvées dans des puits ont permis d'émettre l'hypothèse d'un rôle d'offrande lors de l'ouverture ou du scellage de la structure. Les chaussures étant plutôt par paire dans ces cas-là et cette semelle ayant été portée, usée et même réparée par couture en serpentine, il est peu probable que ce soit une offrande. De plus de nombreux déchets (céramique, bois, etc.)³² ont été trouvés à proximité confirmant que le lieu de découverte était dévolu aux rebuts.

1.5. Identification des valeurs culturelles associées

Chaque objet est porteur de sens et a des significations particulières pour la société qui l'a créé et celle qui en bénéficie actuellement. On nomme ces significations valeurs culturelles³³.

Au regard des informations reportées précédemment sur le contexte socio-culturel et sur la technologie de fabrication, nous avons établi une liste de valeurs culturelles que nous jugeons correspondre à l'objet. Grâce à leur identification, nous pourrions déterminer si elles sont diminuées par l'état actuel de l'objet et quelles seront nos actions pour les préserver.

Notons encore que ces valeurs étant reconnues et attribuées à un moment donné et selon un contexte particulier, leur identification et leur évaluation sont susceptibles de changer dans le temps.

Considéré en Suisse comme « *un des quelques exemplaires de ce type* »³⁴ et sachant qu'« *il faut des circonstances exceptionnelles pour que les semelles et les clous soient encore réunis en milieu archéologique* »³⁵, on peut attribuer une importante valeur de rareté à cet objet.

De surcroît, elle porte une valeur de recherche comportant deux axes. Premièrement, de par sa rareté elle représente une source d'information technologique et typologique importante, permettant de faire des analogies pour des objets moins bien conservés et moins complets. Deuxièmement, en tant qu'objet archéologique documenté comme tel, la semelle apporte des informations permettant l'interprétation du contexte de fouille, menant ainsi à une plus grande compréhension des modes de vie de l'époque.

Elle est aussi porteuse d'une valeur historique puisqu'elle est représentative d'un stade particulier de l'artisanat dans un contexte spécifique.

³¹ Volken, 2005, p.40.

³² Castella, 2016 [communication écrite].

³³ Bertholon, 2012, p.11.

³⁴ Appelbaum, 2007, p.437.

³⁵ Volken, 2011, p.318.

A cela s'ajoute une valeur d'ancienneté, qui se manifeste par des altérations dues à l'usage puis à l'enfouissement de l'objet (corrosion et usure des clous, aspect usé du cuir). Ces indices nous suggèrent qu'elle appartient à un autre temps.

Enfin, à travers sa forme, ses décors et le soin apporté à sa fabrication cette semelle dénote une qualité esthétique³⁶.

2. Conservation-restauration des cuirs archéologiques gorgés d'eau

Afin de mieux comprendre l'état de la semelle, il est nécessaire de présenter brièvement les enjeux de la préservation des cuirs gorgés d'eau ainsi que les traitements effectués en conséquence.

2.1. Aperçu des particularités physico-chimiques liées à l'enfouissement

Fabriqué à partir du derme provenant de peau animale et rendu imputrescible par un processus de tannage, le cuir est un matériau organique protéinique constitué majoritairement de macromolécules de collagène et agencé en différents éléments à différents niveaux formant des faisceaux de fibres (Fig.16, p.17). Le collagène est une protéine dite de structure, qui comporte³⁷ :

- Des séquences régulières d'acides aminés à longues chaînes latérales, porteuses de groupes fonctionnels chimiques variées, susceptibles d'engager des liaisons. C'est sur ces sites que se fixent les tanins*.
- Des séquences d'acides aminés à chaînes latérales courtes, non réactives, qui ont un rôle dans l'organisation spatiale de la molécule ainsi que dans sa stabilité.

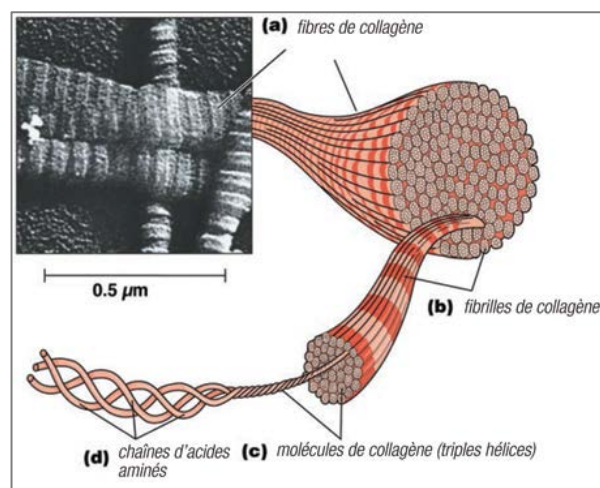


Fig. 16 : structure en éclaté d'une fibre de cuir©SCITEC Nutrition

Du fait de liaisons hydrogènes au niveau des triples hélices et de liaison résultant de la perte d'une molécule d'eau au niveau des chaînes d'acides aminés (liaison peptidique), le cuir est susceptible d'altération par l'hydrolyse et l'oxydation³⁸. De plus, étant une source de nourriture pour la plupart des

³⁶ Appelbaum, 2007, p.437.

³⁷ Chahine et Vilmont, 1988, p.169.

³⁸ de La Baume, 1990, p.232.

micro-organismes, il est aussi particulièrement sensible aux dégradations biologiques (moisissures, bactéries, insectes)³⁹.

Les milieux humides permettent une bonne conservation du cuir, car ils fournissent au cuir un environnement anaérobie et sans lumière, limitant considérablement les réactions chimiques d'oxydation et d'hydrolyse ainsi que la présence de micro-organismes⁴⁰. A noter que les milieux acides sont plus propices à sa conservation car ils limitent les développements bactériens⁴¹.

Parallèlement à cet effet bénéfique, l'eau engendre différentes modifications du matériau. Dans un premier temps, elle lessive les tanins et les protéines, entraînant la libération de sites réactifs dans la protéine de collagène. Dans un deuxième temps, l'eau se fixe sur ces sites et entraîne le gonflement de la structure. Puis elle circule sous forme d'eau libre dans les cavités cellulaires, apportant une plus grande flexibilité au matériau⁴².

L'eau n'étant pas pure, en prenant la place des substances lessivées et hydrolysées, elle introduit des substances inorganiques (silicates, carbonates, oxydes métalliques) et organiques (matériaux dégradés dans les sols) qui se fixent sur les fibres. Certaines de ces substances contribuent, en quelque sorte, à tanner à nouveau le cuir ; ce dernier peut présenter un bon état de conservation tout en étant presque totalement dénaturé et détanné⁴³.

2.2. Conservation post-fouille

Au vu de la présence d'eau dans la structure fibrillaire du cuir, un assèchement idéal ne devrait éliminer que l'eau en excès en conservant une certaine humidité résiduelle au cuir afin qu'il garde ses propriétés⁴⁴.

C'est pourquoi, suite à son excavation, la semelle a été traitée au laboratoire cantonal d'archéologie du canton de Neuchâtel en 1990 par Messieurs Beat Hug et André Glauser, conservateurs-restaurateurs. Selon la fiche de traitement de l'époque (cf annexe 2, p.69-70), les sédiments ont été lavés par eau déminéralisée puis la semelle a été imprégnée de polyéthylène glycol (PEG) 400 à 30% par immersion dans un bain. Puis elle a bénéficié d'un séchage par lyophilisation. Le traitement de stabilisation a été suivi d'un conditionnement provisoire sur une mousse orthopédique de type polyuréthane (PUR) (Fig.17, p.19). Au cours des 26 dernières années, les propriétés de la mousse se sont modifiées. Elle est devenue plus foncée, cassante et a ainsi tendance à s'émietter (Fig.18, p.19).

³⁹ de La Baume, 1990, p.234.

⁴⁰ Karsten *et al.*, 2012, p.9

⁴¹ Ibid, 2012, p.8.

⁴² de La Baume, 1990, p.234.

⁴³ Chahine, 2013, p.298.

⁴⁴ Cortella *et al.*, 2008, p.96-97.



Fig. 17 : semelle sur le conditionnement plâtré en mousse PUR.



Fig. 18 : conditionnement en mousse PUR sans la semelle.

2.2.1. Imprégnation au PEG 400 et séchage par lyophilisation

La méthode consistant à imprégner le cuir de PEG 400 à 30% puis, à le sécher par lyophilisation est la technique la plus couramment utilisée pour la conservation des cuirs gorgés d'eau⁴⁵.

Le PEG – de formule $\text{HO}(\text{CH}_2\text{-CH}_2\text{O})_n$ – est un mélange polyéthers diols obtenus par polymérisation de molécule d'oxyde d'éthylène. Le nom est suivi d'un chiffre qui indique la masse moléculaire moyenne. Ayant deux fonctions alcools aux extrémités des chaînes⁴⁶, il peut se lier à l'eau présente sur les sites réactifs du collagène et contribue à prévenir l'évaporation de l'eau qui conduirait à un *collapse** des fibres de cuir. Sa présence dans la structure limite le retrait fibrillaire et préserve ainsi un réseau interstitiel ouvert⁴⁷.

L'imprégnation des cuirs se fait par bain de quelques jours. La semelle qui fait l'objet de notre étude a ainsi été imprégnée durant 6 jours. Une fois le cuir imprégné, celui-ci est séché par lyophilisation. La lyophilisation repose sur le principe de sublimation de l'eau. Celle-ci passe directement de la forme glacée à la forme gazeuse⁴⁸.

La lyophilisation permet d'obtenir une surface naturelle, une souplesse et une texture agréable qui fait qu'elle est préférée aux autres méthodes (comme le séchage à l'air libre ou le séchage contrôlé)⁴⁹. De plus c'est une technique efficace en matière de temps et qui empêche le développement de micro-organismes durant le traitement⁵⁰.

⁴⁵ Chahine, 2013, p.318 et Karsten *et al.*, 2012, p.21.

⁴⁶ Chahine et Vilmont, 1988, p.169

⁴⁷ Chahine, 2013, p.319.

⁴⁸ Ibid, p.322.

⁴⁹ Chahine, 2013, p.323 ; Graham et Karsten, 2011.

⁵⁰ Graham et Karsten, 2011, p.32.

2.2.2. Conditions de conservation actuelles

Suite au traitement, la semelle a été stockée dans les réserves du SMRA avec les autres matériaux organiques. Cette salle permet une humidité relative (HR) entre 50 et 55%. Ce choix a été fait dans une optique de moindre mal, en privilégiant le matériau le plus rare, c'est-à-dire le cuir.

3. Constat d'état des altérations

3.1. Méthodologie et analyses employées

L'examen diagnostique permet de décrire l'état actuel de la semelle et d'apporter des hypothèses quant à la nature des dommages subis, leurs évolutions futures ainsi que les impacts attendus sur les valeurs culturelles. Pour ce faire, nos observations ont été réalisées à plusieurs niveaux.

En premier lieu, nous avons effectué une observation macroscopique, à l'oeil nu, afin d'appréhender l'état global de l'objet. Nous avons ensuite employé des méthodes d'observations plus poussées tel qu'une loupe binoculaire *Olympus SZ61®*, un microscope optique *Zeiss Axioskop 2 MAT®* et un microscope *Olympus DSX 110®* avec prise de vue EFI (*Extended Focal Image*).

Nous avons également utilisé des méthodes descriptives propres aux cuirs et aux métaux archéologiques. Ainsi, nous avons repris des critères d'observation utilisés dans une étude servant à l'évaluation de l'état des fibres de cuir élaborée par René Larsen (1996) et visant à évaluer la friabilité des fibres et la cohésion de surface.

En ce qui concerne l'état des clous, nous avons employé une méthode de description développée par Régis Bertholon (2000), s'appuyant sur des notions de faciès et de strates pour évaluer l'état des clous par l'observation des produits de corrosion. Nous avons opté pour un usage simplifié de la méthode descriptive en nous focalisant sur un relevé des altérations types sur les clous, une localisation sur l'ensemble du cloutage et une interprétation de l'organisation des strates d'après l'observation de zones de cassures et d'éclats. L'observation a été appuyée par des appréciations sensorielles qui ont été obtenues par l'utilisation d'un scalpel permettant d'apprécier les propriétés physiques des produits de corrosion (friabilité et dureté au contact de la lame). Cette méthode de sondage a été appliquée sur quelques clous, car certains présentaient une fragilité mécanique ne permettant pas une telle action.

Après la première phase descriptive, nous avons affiné nos observations et étayé nos hypothèses par des moyens analytiques.

Nous avons procédé à un prélèvement de cuir pour effectuer une analyse IRTF-ATR (spectroscopie InfraRouge à Transformée de Fourier en Réflectance Totale Atténuée), afin d'identifier des dépôts

présents sur les fibres ainsi qu'une mesure du pH pour évaluer le degré d'acidité du cuir et tenter de corréler cette valeur avec une éventuelle dégradation du PEG.

Pour affiner nos observations et apporter des données qualitatives sur la nature de la corrosion, l'analyse IRTF-ATR a aussi été effectuée pour caractériser trois produits de corrosion. Les produits de corrosion recherchés ont été définis par des hypothèses acquises en faisant des liens entre observation et littérature.

Les analyses IRTF-ATR et les interprétations des spectres ont été réalisées à la Haute Ecole Arc de Neuchâtel, par Madame Laura Brambilla, adjointe de recherche au sein de l'équipe Recherche et Développement en conservation-restauration. Les détails des analyses et des tests effectués ainsi que les données techniques, le type d'appareil employé et l'échantillonnage sont consultables en annexe 3, p.71-74.

3.2. Description des altérations et localisation

3.2.1. Fragmentations et fissures

Les fissures sont visibles entre des clous, notamment au niveau du talon. Sur le côté chair, les fissures du talon apparaissent plus visibles et plus larges que sur le côté fleur (Fig.19-20, p.21).

Une fragmentation a eu lieu sur le côté droit du talon. Les altérations physiques des clous sont quant à elles, majoritairement, sous forme de cassures localisée au niveau des pointes des clous côté chair. Certains des clous dont la pointe est brisée sont mobiles par rapport au cuir mais la plupart demeurent indissociables.



Fig. 19: fissures du talon côté fleur.



Fig. 20 : fissures du talon côté chair.

3.2.2. Traces d'usures

On constate une ouverture de certaines perforations du cuir, rendant les clous mobiles et parfois dissociables. On note aussi une usure de la couche papillaire, en particulier vers la pointe et l'articulation qui laisse apercevoir la couche réticulaire (Fig. 21 - 22, p.22). Sur les clous, l'usure se traduit par un aplatissement des têtes et par conséquent, une augmentation du diamètre de la tête. Les clous sont plus usés au niveau du talon.



Fig. 21 : vue d'ensemble de l'usure du cuir de la pointe.

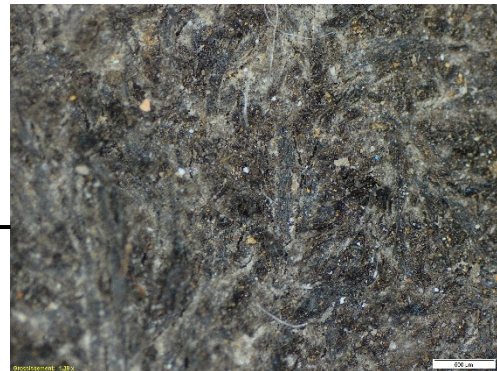


Fig. 22 : vue agrandie de l'usure de la couche papillaire laissant apercevoir la couche réticulaire sous-jacente dont les fibres sont plus épaisses (x1.38)

3.2.3. Cohésion et friabilité du cuir

Nous avons évalué la cohésion de surface en grattant une très petite zone avec le dos d'un scalpel. Côté fleur, il en résulte une très fine poussière peu importante. Côté chair, quelques particules se détachent, mais la cohésion du réseau fibreux est plutôt bonne.

Concernant l'évaluation de la friabilité des fibres, la méthode consiste à placer un échantillon de fibres du côté chair sous loupe binoculaire et à observer si, sous l'action douce du dos d'un scalpel, les fibres se détachent en fibres ou en fine poussière⁵¹. La proportion fibres/poussières est ensuite comparée à un référentiel (cf annexe 3, p.75). Ainsi nous observons qu'une fine poussière est produite, mais que les fibres demeurent relativement entières quand elles se détachent (Fig.23-24, p.23). Néanmoins, en prenant en compte que les fibres se détachent facilement sous une action mécanique, nous évaluons la

⁵¹ Larsen *et al.*, 1996, p.113.

cohésion comme modérée et non pas comme bonne. Il importe de se rendre compte également que la cohésion peut varier au sein d'une même pièce de cuir⁵².

Les zones de cassures, de trous et de lacunes sont plus friables, comme en témoignent des dépôts de fibres sur le conditionnement sous ces zones.

Enfin, bien que les fibres soient plutôt cohésives, la pièce de cuir est peu souple et est sensible aux sollicitations mécaniques, en particulier au niveau de la pointe où l'épaisseur est moindre.



Fig. 23 : fibres avant test (x 0.66)



Fig. 24 : fibres après test (x 0.66)

3.2.4. Dépôts divers

La surface du cuir est recouverte d'un dépôt blanc opaque plus ou moins épais. Ce dépôt est plus présent sur la surface qui était en contact avec la mousse PUR de l'ancien conditionnement. Les tiges des clous visibles sur cette face en sont également recouvertes. Il y a aussi des particules provenant de la mousse PUR (cf annexe 3, fig.61-64, p.76). Sous loupe binoculaire, le dépôt blanc se présente sous forme d'une couche de filaments entremêlés (Fig. 25, p.23). Son aspect et les données récoltées liées à l'histoire de l'objet concordent vers l'hypothèse que le dépôt est un PEG. L'analyse FTIR-ATR des fibres du cuir a permis de caractériser ces dépôts et de confirmer leur nature. La plupart des pics correspondent en effet au spectre d'un PEG (Fig. 26, p.24).

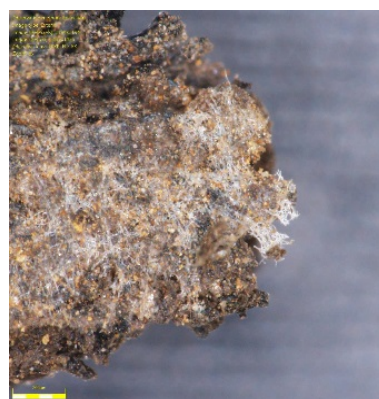


Fig. 25 : prélèvement de cuir analysé par IRTF-ATR

⁵² Larsen *et al.*, 1996, p.114.

Sous microscope en fond noir, les fibres sont recouvertes de nombreux dépôts sous forme de particules variant du gris à l'orange (cf annexe 3, fig. 65-66, p.76). Ceux-ci sont probablement liés à des dépôts de sédiments ainsi qu'à des dépôts de sels métalliques. L'analyse FTIR-ATR a confirmé la présence de sédiments avec un pic à 1018 cm^{-1} correspondant à un silicate.

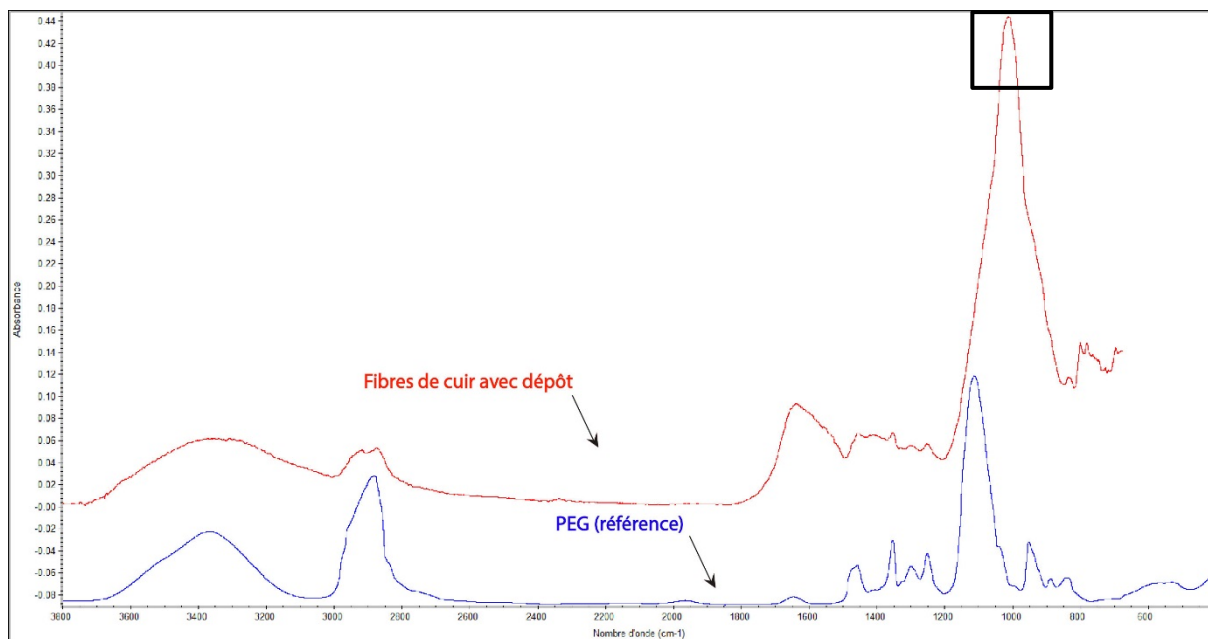






Fig. 26 : Spectre FTIR-ATR de fibres de cuir montrant une concordance avec un PEG (1456 cm^{-1} , 1350 cm^{-1} , 1300 cm^{-1} , 1250 cm^{-1} , 833 cm^{-1}) et un pic à 1018 cm^{-1} correspondant à un silicate (en noir).

3.2.5. Faciès de corrosion des clous

Le faciès de corrosion* des clous se présente comme une corrosion généralisée mais non uniforme⁵³. C'est-à-dire que l'ensemble d'un clou est corrodé mais qu'on y trouve différents types de corrosion.

De manière générale, les produits de corrosion sont relativement similaires d'un clou à un autre. Nous avons dressé un relevé des altérations physico-chimiques types pour l'ensemble du cloutage ci-dessous (cf tableau 1, p. 25).

⁵³ Bertholon, 2002, p.65.

Altération	Description	Illustration photographique
Sédiments gris en surface	Présence d'un sédiment fin en surface avec grains de sable.	
Produit de corrosion bleu	Produits de corrosion bleu présent sur la couche de produits corrosion supérieure. En dépôts sur le cuir en périphérie des clous atteints.	
Produits de corrosion orange poudreux	Produit de corrosion orange vif à l'aspect poudreux et présent en surface. En dépôts sur le cuir en périphérie des clous atteints.	
Soulèvement	Soulèvement des couches supérieures de corrosion qui se fissurent et se séparent du substrat.	



Exsudat	Micro bulle (env. 0.01 mm de diamètre). Couleur orangée brune.	
Eclatement et produit de corrosion orange foncé sous la surface	Eclatement avec présence de produits de corrosion orange foncé sous les zones d'éclatements et par amas.	

Tableau 1 : relevé des altérations physico-chimiques type

Grâce à une cartographie des altérations, on note cependant des variations dans l'ampleur de certains produits de corrosion suivant la localisation sur la semelle (cf cartographie fig. 27, p.27).

Vers la pointe, les clous sont, proportionnellement, recouverts de plus de produits de corrosion orange et pulvérulents, ainsi que, ponctuellement, d'exsudats orangé-brun. Les produits de corrosion orange vif sont généralement aussi présents en dépôts sur le cuir à côté des clous (cf annexe 4, fig.67, p.77). Vers le talon, on observe une plus grande récurrence des produits de corrosion bleus. Ces produits de corrosion bleus sont peu volumineux et se retrouvent sous forme de dépôts sur le cuir en périphérie des clous (cf annexe 4, fig. 68, p. 77).

Bien que présents sur l'ensemble du cloutage, les soulèvements et les éclatements sont plus importants vers l'avant de la semelle.

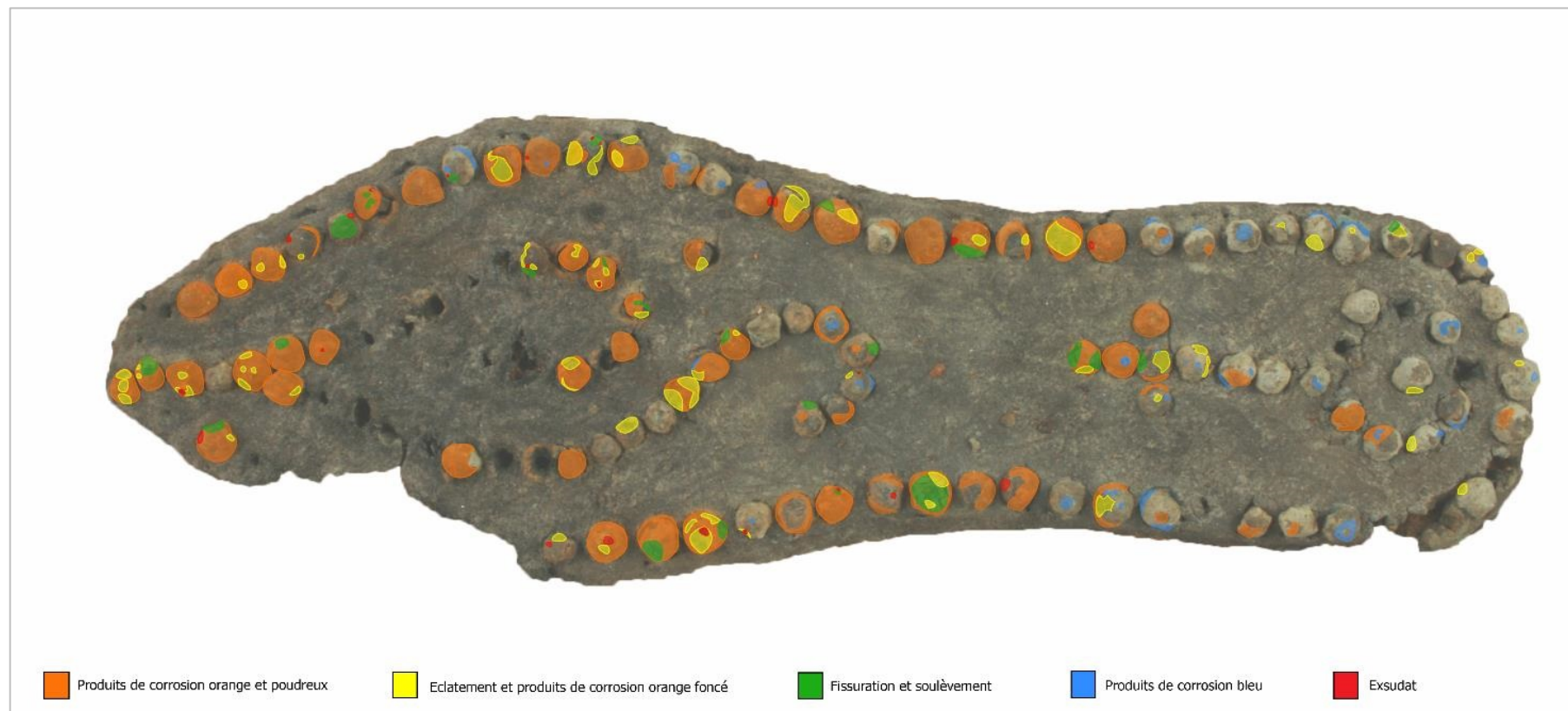


Fig. 27 : Localisation des altérations physico-chimiques sur les clous.

3.2.6. Description stratigraphique et caractérisation des produits de corrosion

Lorsqu'une stratigraphie des produits de corrosion est établie, la corrosion est présentée sous forme de strates. Une strate correspond à « *volume élémentaire résultant d'un découpage raisonné du matériau et présentant une certaine homogénéité à l'échelle de l'observation selon les caractères observés* »⁵⁴. Chaque strate est ainsi décrite d'après différents codes qui utilisent des termes précis, cherchant à utiliser un langage qui soit le plus commun possible (Fig.28, p.28).

Types de strate Strata types	Définition	Code principal
Produits de corrosion <i>Corrosion products</i>	Strate formée principalement de produits de corrosion	CP
Sédiment <i>Soil</i>	Strate formée principalement de sédiments adhérents (même faiblement) autres que des produits de corrosion, généralement un mélange de terre, débris minéraux ou organiques	S
Dépôt <i>Deposit</i>	Strate formée par précipitation chimique ou formation biologique au contact du métal ou du matériau corrodé	D
Métal <i>Metal</i>	Strate constituée de métal non corrodé quel que soit le métal de base et quelle que soit sa position stratigraphique.	M
Métal corrodé <i>Corroded metal</i>	Strate formée de métal présentant une corrosion interne.	CM
Vide <i>Void</i>	Strate représentant un espace vide, une cavité ouverte ou fermée, au sein des autres strates.	V
Matériau non métallique <i>Non-metallic material</i>	Strate constituée d'un matériau non métallique. Ce matériau peut constituer une partie de l'objet, être un élément du décor, etc., ou être associé à l'objet. Le matériau peut être ou non altéré.	NMM
Pseudomorphe de matériau organique <i>Pseudomorphic organic material</i>	Strate constituée de matériaux organiques (bois, cuir, textiles, etc.) partiellement ou totalement dégradés dont la forme est conservée par des produits de corrosion.	POM

Fig. 28: types de strates et codification principale ©Bertholon, 2002, p. 58.

Une fois les strates identifiées, elles sont reproduites de manière graphique dans une certaine organisation. Cela permet d'obtenir la structure de la corrosion (Fig. 29-30, p.29 et tableau 2, p.30-31).

Dans notre cas, certaines couleurs ont été reprises de la cartographie afin de faire des liens plus faciles

⁵⁴ Bertholon, 2002, p.65.

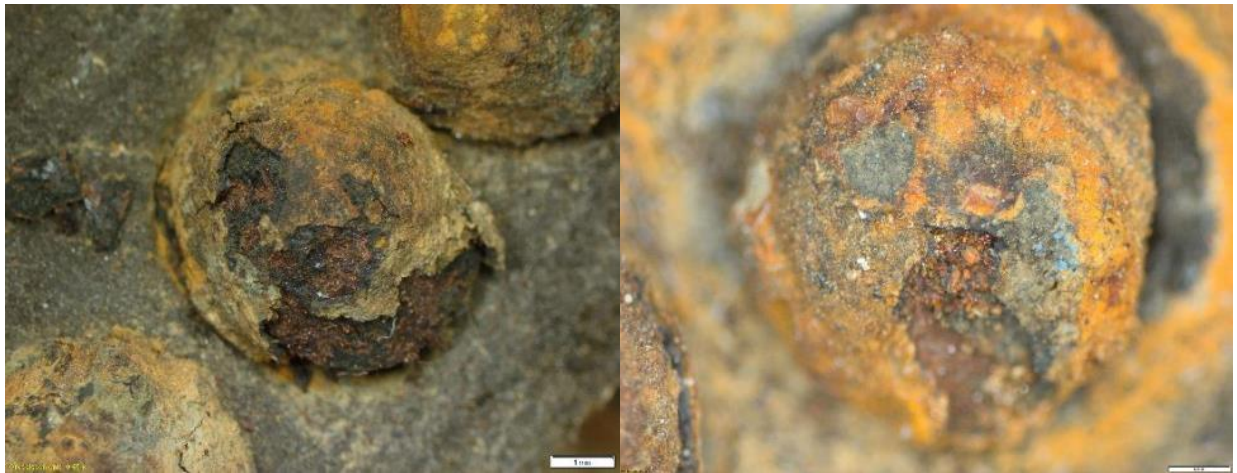


Fig. 29 : zones d'éclat permettant d'apercevoir la stratigraphie

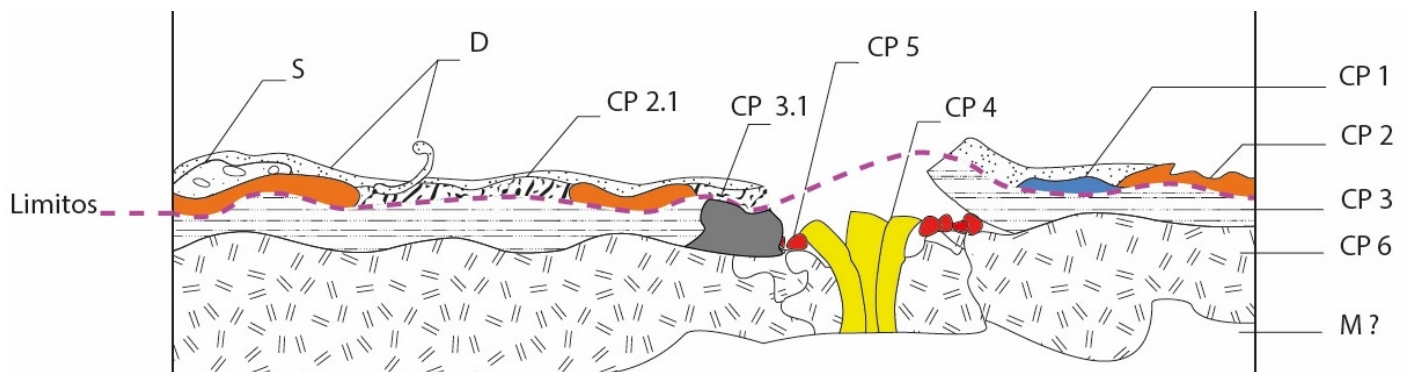









Fig. 30 : stratigraphie des produits de corrosion (S: Sédiment ; D: Dépôts ; CP : Produits de corrosion ; M : Métal)

Légende	Strate	Marqueur	Couleur	Description	Hypothèse de la nature des strates
	D	Supérieur : Dépôts exogènes	Blanc opaque	Dépôt en surface sous forme de filaments. Surtout visible au niveau des tiges des clous.	PEG
	S	Supérieur : Grains de sable fin	Gris beige clair	Sédiments fins avec grains de sable.	Sédiments ?
	CP1	Supérieur : Contient des sédiments sous forme de cristaux.	Bleu clair	Produits de corrosion bleu pulvérulents. Aspect mat.	Vivianite (Phosphate de fer II)
	CP 2	Supérieur : Contient des sédiments sous forme de cristaux.	Orange clair	Produits de corrosion pulvérulents. Précipite sur le cuir en périphérie des clous. Couche peu adhérente.	Oxydes de fer (Fe II ou Fe III) ?
	CP 2.1.	Supérieur : Contient des sédiments sous forme de cristaux.	Orange foncé-rouge	Produit de corrosion dense, peu pulvérulent. Au même niveau que CP 2.	Oxydes et/ou hydroxydes de fer ?
	CP 3	Correspondant : Surface lisse. Traces technologiques ?	Noir-brun foncé	Produit de corrosion plutôt lisse et dense. Présent sous les marqueurs supérieurs.	Magnétite (oxyde de fer) ?
	CP 3.1	Correspondant : Surface lisse. Traces technologique ?	Gris	Produit de corrosion dense, plutôt lisse.	Sidérite (carbonate de fer II) ?





Légende	Strate	Marqueur	Couleur	Description	Hypothèse de la nature des strates
	CP 4	Inférieur : Soulève et fissure la couche CP 4.	Orange-rougeâtre	Produit de corrosion par amas. Peu adhérents.	Akaganéite (β -FeOOH) ?
	CP 5	Inférieur : soulève et fissure la couche CP 3.	Orange-brun	Exsudats sphériques. Aspect brillant. Organisés par amas ou par goutte individuelle. Parfois sous un éclat, parfois dans une fissure.	Chlorure de fer II ou III ? Hydroxydes de fer ?
	CP 6	Inférieur : Se situe sous les éclats.	Noir	Produits de corrosion à la surface inégale et creusée.	Magnétite (oxyde de fer) ?
	M		?	Nous n'avons pas observé de résidus métalliques, mais ne pouvons en exclure la présence.	Acier ?

Tableau 2 : légende de la stratigraphie

Nous relevons ainsi que les strates supérieures sont constituées principalement de dépôts de PEG plus ou moins épais (D) ainsi que de sédiments (S). Les sédiments sont présents en couches très fines et sont souvent présents sous la forme de grains piégés dans les couches supérieures de produits de corrosion (CP 1, CP 2, CP 2.1).

D'après l'analyse IRTF-ATR, nous avons pu identifier le produit de corrosion bleu (CP1). Il s'agit de phosphate de fer II, de son nom minéral vivianite (Fig. 31-33, p.32).⁵⁵

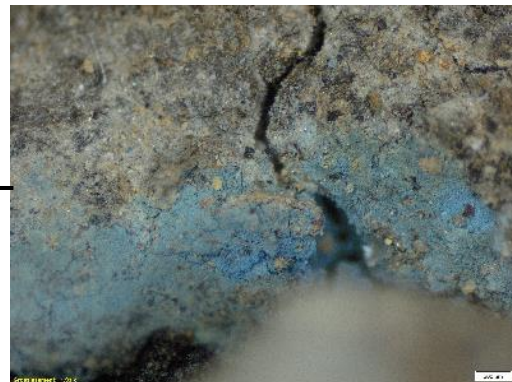


Fig. 31: localisation du prélèvement de CP1.

Fig. 32: détail de la zone de prélèvement de CP1.

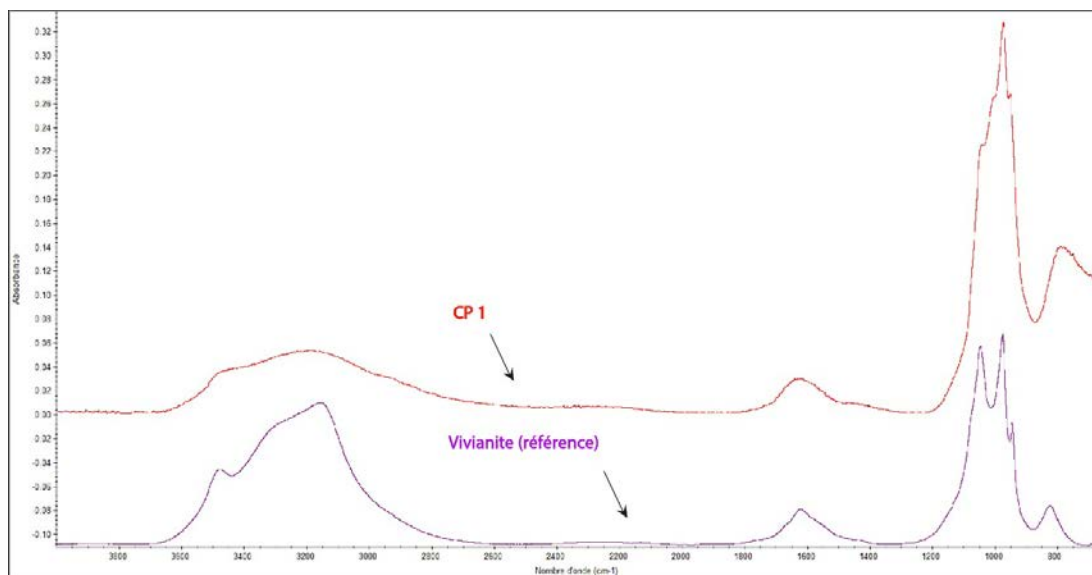


Fig. 33 : spectre IRTF-ATR permettant l'identification de la strate CP 1.

⁵⁵ Selwyn, 2004, p.116 et Scott et Eggert, 2009, p.73-74.

Une analyse IRTF-ATR a permis d'identifier la strate CP 4 (Fig.34-36, p.33). Il s'agit d'akaganéite (β -FeOOH), un hydroxyde de fer qui se forme depuis l'interface métal/produits de corrosion et qui a une forme caractéristique allongée représentée sur la stratigraphie.

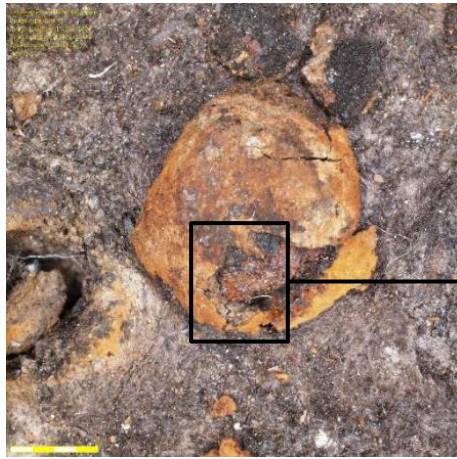


Fig. 34 : localisation du prélèvement de la strate CP 4.

Fig. 35 : détail de la strate CP 4.

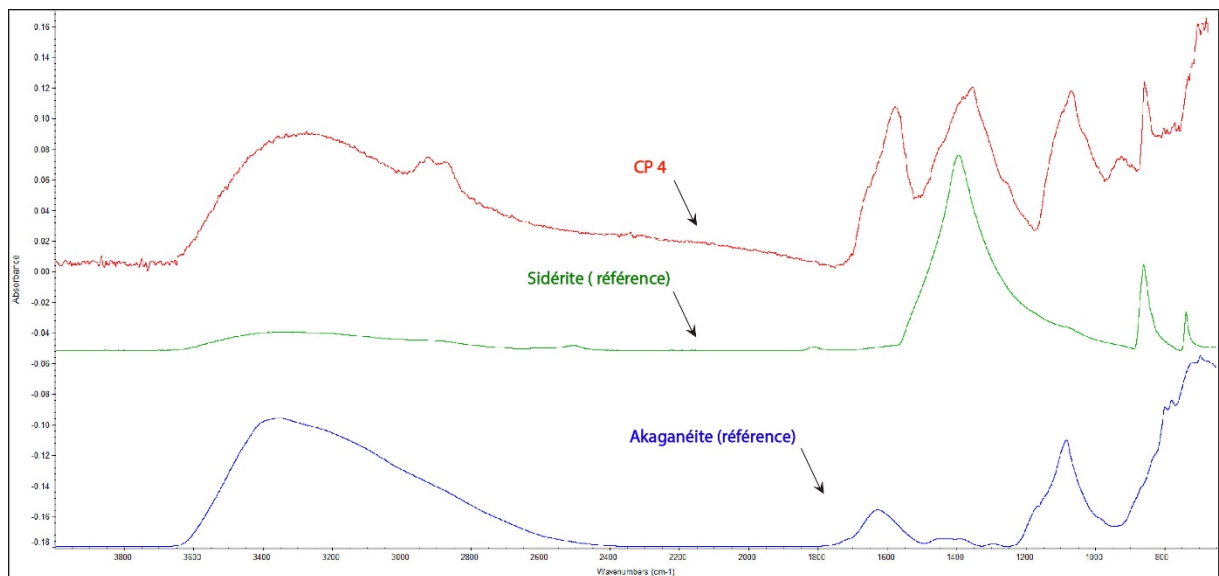


Fig. 36: spectres IRTF-ATR permettant l'identification de la strate CP 4. Il y aussi présence de sidérite (1356 cm⁻¹, 856 cm⁻¹ et 732 cm⁻¹). Cette dernière constitue certainement la couche CP 3.1 prélevée par inadvertance.

Enfin, la strate CP 5, constituée d'exsudat, est située sur ce schéma dans une zone d'éclat mais se retrouvent aussi en surface, sortant de fissures (cf annexes 4, Fig.69-70, p.77).

3.3. Diagnostic

Les altérations relevées précédemment dépendent de facteurs physico-chimiques intrinsèques aux matériaux, mais aussi d'agents extrinsèques provenant des différentes étapes de la vie de l'objet (usage, abandon, enfouissement, excavation, traitement, conservation).

Dans le cas d'un objet archéologique, ces facteurs peuvent être compliqués à identifier car influencés par la présence ou non d'éléments dans le milieu d'enfouissement (pH, composition du sol, polluants divers provenant de l'activité humaine)⁵⁶. Dans notre cas, la présence de matériaux de restauration et de conditionnement accentue cette complexité.

Nous n'avons donc pas la prétention d'expliquer tous ces phénomènes mais plutôt d'en comprendre les principes et les impacts utiles aux choix des traitements à effectuer.

3.3.1. Interaction du cuir et des clous

Indépendamment des phénomènes d'altérations individuels, le cuir et l'alliage ferreux réagissent ensemble et développent des altérations propres à ces interactions. L'association de cuir et d'alliage ferreux peut en effet conduire à des zones de confinement et un taux d'humidité plus ou moins élevé sera maintenu à l'interface métal/cuir favorisant l'oxydation du fer⁵⁷. C'est probablement pourquoi on retrouve une accumulation de produits de corrosion au niveau de l'interface cuir/clou.

Or, l'oxydation du fer engendre une accentuation de l'altération du cuir en catalysant les réactions de dégradations des chaînes polypeptidiques des protéines de collagènes⁵⁸. L'oxydation conduit à des altérations caractérisées par une perte de souplesse et de résistance induisant des pulvérulences⁵⁹. Cette perte de solidité et le volume des produits de corrosion en dépôt peuvent avoir provoqué les fissures à proximité des clous.

3.3.2. Usage

On explique difficilement l'impact de l'usage de l'objet sur les dégradations visibles actuellement. Sans témoignage écrit ou oral relié directement à cet objet, on ne peut pas définir avec certitude quelles sont les dégradations dues à l'usage.

Sur cette semelle, on peut établir des corrélations entre les traces observées et l'usage d'une semelle tel qu'on le connaît. L'archéologie expérimentale nous permet d'effectuer des parallèles⁶⁰. Sous lumière rasante, nous observons sur le cuir des plis ainsi qu'une usure pouvant être corrélées aux traces d'usures

⁵⁶ Scott et Eggert, 2009, p.131.

⁵⁷ Degriigny et Guilminot, 1998, p.6.

⁵⁸ Chahine, 2013, p.279.

⁵⁹ Ibid, 2013, p.346 et Selwyn, 2004, p.42.

⁶⁰ Volken, 2016 [Communication orale].

que l'on observe sur des reconstitutions qui ont été portées (Fig. 37-38, p.35). Pareillement pour les clous, l'aplatissement des têtes peut être mis en lien avec une action mécanique au contact du sol lors de la marche. Les différences d'usure des clous selon le positionnement sur la semelle sont ainsi en lien avec la manière dont le marcheur pose le pied



Fig. 37 : Reconstitution de deux semelles dont celle de gauche a été portée. Les clous sont usés ainsi que la surface du cuir au niveau de la pointe ©Volken, 2016.



Fig. 38 : vue sous lumière rasante de la face côté fleur.

3.3.3. Enfouissement et mise au jour

Le milieu d'enfouissement a eu un impact mécanique et physico-chimique sur l'objet. Le poids de la terre et les mouvements du sol ont vraisemblablement induit des contraintes mécaniques sur l'objet qui ont engendré des dégradations structurales. Ainsi, la diminution de l'épaisseur du cuir, la lacune de la pointe ainsi que la cassure des tiges des clous peuvent aussi être imputables aux contraintes mécaniques du milieu d'enfouissement. La présence d'eau, ses mouvements ainsi que les particules en suspension qu'elle contient ont certainement contribué à une abrasion de surface de la semelle⁶¹.

Au niveau physico-chimique, les minéraux présents sur les fibres sont plus ou moins dissous, mais lors de l'excavation certains cristallisent en contact avec l'air et entraînent la fragilisation des fibres⁶². Ainsi

⁶¹ de La Baume, 1990, p.235.

⁶² Ibid, p.236.

le fait que ces minéraux (dépôts visibles sur les fibres) soient encore présents peut avoir contribué à la pulvérulence et à la fragilité mécanique du cuir⁶³.

Concernant les clous, le milieu anaérobie dans lequel s'est trouvé la semelle a certainement permis une corrosion lente du fer ayant provoqué la formation de produits de corrosion peu volumineux⁶⁴.

Lorsqu'ils sont sous le sol, les alliages ferreux corrodent par formation de couches successives. La couche inférieure contenant la limite de la surface d'origine est généralement formée principalement de magnétite (Fe_3O_4) dont la couleur noire est caractéristique (CP 3, voir p.29). Il est possible qu'elle contienne également de la sidérite (CP 3.1, voir p.29), un carbonate de fer (II) identifié par IRTF et déjà relevé en présence de magnétite⁶⁵. Les strates externes sont, elles, fréquemment composées de produits de corrosion plus volumineux et orange qui sont formés d'hydroxydes et d'oxydes de fer divers (par exemple : goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) et lépidocrocite ($\gamma\text{-FeOOH}$))⁶⁶ et contiennent souvent des sédiments. Ce sont certainement les couches CP 2 et CP 2.1 (voir p.29).

Concernant la strate CP 1, nous avons pu déterminer par IRTF-ATR qu'elle était constituée de vivianite (phosphate de fer (II)). La vivianite se forme en présence d'ions phosphates dans des milieux riches en matière organique dégradée, milieu qui a pu être fourni par l'enfouissement dans les couches de comblement du canal qui contenaient un nombre important de déchets dont des os⁶⁷.

La localisation relative de la limite de la surface d'origine* (notée *limitos* sur la stratigraphie, p.29) a été identifiée sous les produits de corrosion supérieurs (CP 1, CP 2, CP 2.1 voir p.29) dont la présence de grains de sable permet, dans ce cas-ci, de les situer comme supérieurs et sur les produits de corrosion inférieurs (CP 4, CP 5, CP 6 voir p.29). Ces derniers ont été situés comme inférieurs car ils se situent en dessous des traces technologiques et ont un caractère amorphe. De plus, CP 4 et CP 5 font éclater les couches supérieures et le clou perd sa forme, indiquant que ces deux strates se situent sous la limite de la surface d'origine.

Sous la limite de la surface d'origine, la présence d'akaganéite ($\beta\text{-FeOOH}$) (CP 4, voir p.29) et d'exsudats (CP 5, voir p.29) est un signe d'une forte concentration en ions chlorures⁶⁸. Les clous n'ayant pas bénéficiés d'un traitement servant à l'extraction des ions chlorures, il n'est pas étonnant de retrouver ces composés.

Les chlorures se retrouvent dans presque tous les sols et pénètrent les couches de corrosion lors de l'enfouissement. Quand le fer corrode dans le sol, il se charge positivement et attire donc les charges

⁶³ Bonnot-Diconne, 2016 [Communication orale].

⁶⁴ Bergeron et Rémillard, 1991, p.33.

⁶⁵ Reguer, 2005, p.171.

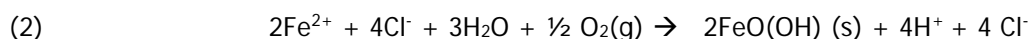
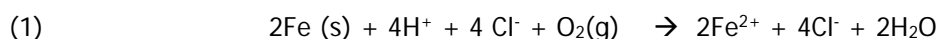
⁶⁶ Selwyn, 2004, p.114.

⁶⁷ Scott et Eggert, 2009, p.73.

⁶⁸ Selwyn, 2004, p.117-118.

négatives. Les chlorures ont des charges négatives et vont être retenus à l'interface du métal, sous la couche de produits de corrosion. Avec l'eau liquide du milieu d'enfouissement et les ions de fer (FeII), se forme une solution de chlorure de fer acide⁶⁹.

Lorsque l'objet est excavé, le nouveau milieu est caractérisé par une humidité relative moindre ainsi qu'une plus grande disponibilité en oxygène. Exposés à l'air, les ions fer (II) en solution s'oxydent et se transforment en hydroxydes et oxydes de fer. Un cycle de corrosion se met en place⁷⁰ :



Les ions chlorures (Cl⁻) étant insolubles, le cycle se perpétue. Les ions hydrogène (H⁺) libérés par cette réaction d'oxydation réagissent alors avec le fer et altèrent chimiquement l'objet en consommant le fer⁷¹.

L'akaganéite (β-FeOOH) est instable car sa structure retient des ions chlorures, elle peut donc relâcher des chlorures et entraîner des nouveaux cycles de corrosion. De plus, elle se forme à l'interface métal/produits de corrosion et de par sa forme caractéristique allongée, induit des pressions sur les couches de produits de corrosion supérieurs, conduisant aux fissures et aux éclatements présents sur les clous⁷².

Concernant les exsudats (CP5, voir p.29), Selwyn et al. (1999) ont défini que leur présence sur les objets archéologiques en fer est le résultat de la solubilisation des sels de chlorures de fer II et III en présence d'une humidité relative élevée (environ 50-55%)⁷³. L'analyse IRTF-ATR n'a pas pu permettre l'identification de chlorures de fer II ou III. Il est fort probable que ceux-ci ne soient pas détectables par IRTF-ATR⁷⁴ ou qu'une fois en contact avec l'oxygène, les chlorures de fer se soient transformés en oxydes et hydroxydes de fer⁷⁵, notamment en akaganéite (β-FeOOH), dont nous avons pu identifier une partie du spectre (Fig.39, p.38). Les pics correspondant au PEG, témoignent quant à eux de l'imprégnation des clous lors du traitement de 1990.

⁶⁹ Rimmer *et al.*, 2013, p.9-10.

⁷⁰ Selwyn *et al.*, 1999, p.219

⁷¹ Selwyn, 2004, p.116.

⁷² Selwyn *et al.*, 1999, p.224.

⁷³ Ibid, 1999, p.220.

⁷⁴ Laura Brambilla 2016 [Communication orale].

⁷⁵ Scott et Eggert, 2009, p.57-58.

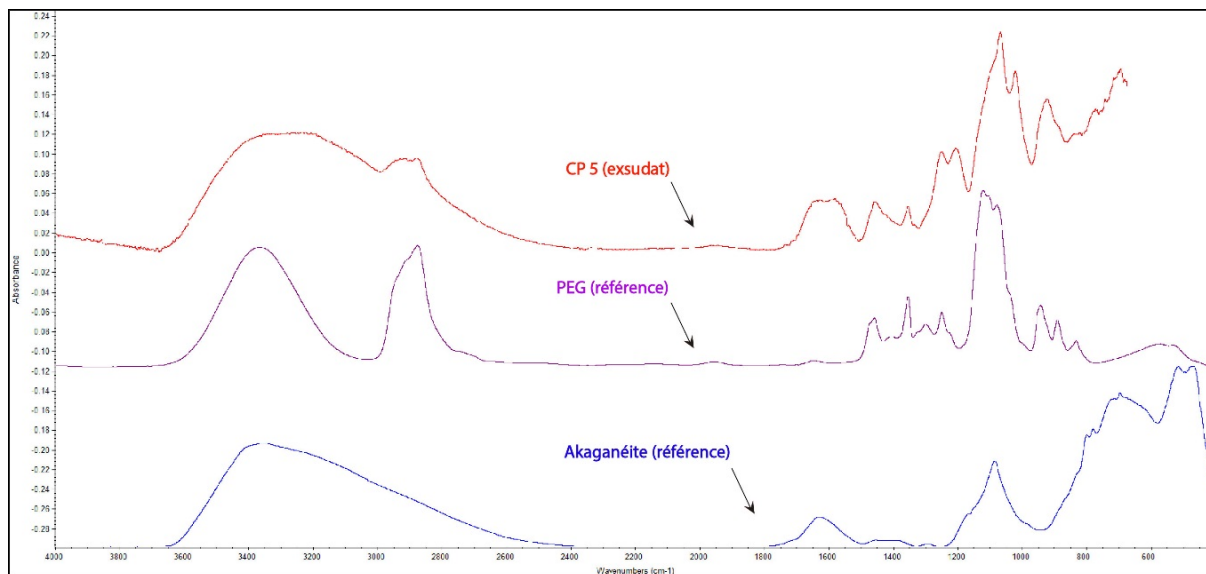


Fig. 39 : spectre IRTF-ATR d'un exsudat (CP 5). Du fait de la présence d'un mélange, le composé est difficilement identifiable. Il y a présence de traces de PEG et d'akaganéite (β -FeOOH).

3.3.4. Vieillissement du PEG 400

Il est certain que les traitements effectués en 1990 ont contribué à la préservation de l'objet. Si ces traitements n'avaient pas été mis en place, la semelle serait en moins bon état.

Mais le PEG a un impact sur l'objet et peut expliquer certains phénomènes de dégradation. En rajoutant un matériau qui devient quasiment constitutif de l'objet, des nouvelles interactions peuvent intervenir. Le PEG est un matériau organique susceptible de s'oxyder et cela même à faible température⁷⁶. Lors de l'oxydation se créent des hydroperoxydes, très instables, qui créeront des réactions en chaîne en provoquant la scission de la molécule. Les produits obtenus en fin de chaîne sont constitués principalement d'aldéhydes et de formiates induisant un milieu plus acide⁷⁷. Si du fer est présent, l'oxydation du PEG est augmentée⁷⁸. Il est aussi démontré que le PEG 400 a un mauvais pouvoir consolidant⁷⁹. Ainsi des cuirs présentant une certaine friabilité en sortie de fouille continueront à présenter des pertes de matière même avec un traitement par PEG

⁷⁶ Chahine, 2013, p.326.

⁷⁷ Ibid, p.326.

⁷⁸ Morlat-Therias *et al.*, 2007, p.55.

⁷⁹ Graham et Karsten, 2011, p.35.

Malgré cette dégradation, le cuir traité par PEG supporte mieux le vieillissement que les cuirs qui n'ont pas été traités. Les aldéhydes en se fixant sur le collagène contribuent à le « tanner » et le protège ainsi de la dégradation⁸¹.

Par contre ces mêmes produits de dégradation favorisent la formation de l'akaganéite (β -FeOOH)⁸² ainsi que la corrosion en général⁸³.

Afin d'évaluer le degré d'acidité du cuir, nous avons effectué deux tests pH des fibres du cuir par micro-échantillonnage. Par rapport à la valeur de référence obtenue dans la littérature pour un cuir gorgé d'eau, il semble que le pH mesuré ne soit pas très acide (cf tableau 3, p.39). Il est difficile de corréler ces valeurs avec la formation des produits de corrosion. De plus, le pH peut varier au sein d'une même pièce de cuir⁸⁴. Néanmoins, Selwyn (2004) mentionne que lorsqu'un pH se situe entre 4 et 9.5, la vitesse de corrosion d'un acier doux est relativement uniforme⁸⁵. L'acidité du cuir peut donc avoir un effet mais de manière mesurée.

Extrait	pH mesuré
Cuir archéologique gorgé d'eau (valeur de référence obtenue dans la littérature) ⁸⁰	3-6
Extrait n°1	6.01
Extrait n°2	5.77

Tableau 3 : résultats des mesures de pH

⁸⁰ Malea *et al.*, 2012, p.571.

⁸¹ Chahine, 2013, p.327.

⁸² Thickett et Odlyha, 2013, p.113.

⁸³ Selwyn, 2004, p.36-37.

⁸⁴ Thomson, 2006, p.60.

⁸⁵ Selwyn, 2004, p.37.

3.3.5. Manipulation et conservation post-fouille

Les manipulations ainsi que la conservation de l'objet ont eu aussi un impact sur les altérations de cette semelle.

Des photographies de 1990 témoignent d'un état différent (Fig.40, p.40). La fragmentation du talon n'est pas visible et plus de clous sont présents (109 pour 103 aujourd'hui). On peut en conclure que la fragmentation a eu lieu soit lors de l'excavation, soit plus tard lors de manipulations divers (traitement, étude, conditionnement). Pour ce qui est des clous, il est probable que les clous manquants soient tombés ou aient été dissociés.



Fig. 40 : semelle en l'état (à gauche) et lors de sa découverte (à droite). Le talon n'est pas fragmenté et quelques clous en plus sont présents (en blanc).

Concernant les conditions de conservation, le support en mousse PUR présente une réticulation importante le rendant friable et rêche. Ce changement des propriétés physiques est lié à la dégradation du matériau⁸⁶. Bien que présentant des capacités mécaniques intéressantes pour le stockage d'objet (absorption des chocs), les mousses PUR sont peu stables dans le temps. La dégradation du polyuréthane entraîne la formation d'un milieu acide avec formation d'aldéhydes et de formiates⁸⁷, qui est un facteur prépondérant pour la reprise de la corrosion⁸⁸. Les clous étant implantés dans la mousse, ceux-ci sont d'autant plus susceptibles d'être dégradés mécaniquement et chimiquement. Outre l'aspect chimique, le conditionnement est peu adéquat pour la manipulation de l'objet car il ne permet plus un maintien suffisant. La lisibilité de la semelle est également perturbée par le volume de la mousse qui ne permet pas d'apprécier la forme et l'épaisseur de l'objet. De plus, son aspect réticulé et la présence de nombreux dépôt lui donnent un aspect sale limitant la valeur esthétique.

Enfin, le climat dans lequel la semelle a été stockée a lui aussi un impact, en particulier sur les clous. Les taux d'HR maintenus étaient en effet tout à fait adéquats pour la conservation du cuir (50-55%) mais ont probablement contribué à la corrosion active des clous. D'où la nécessité d'une réévaluation des conditions climatiques.

⁸⁶ Pellezzi, 2012 [En ligne], p.13-16.

⁸⁷ Ibid, p.16.

⁸⁸ Selwyn, 2004, p.39.

3.4. Pronostic et propositions d'intervention

Pronostic

Dans l'ensemble, la semelle présente un bon état de conservation dans le sens où elle est relativement complète et le cuir permet une bonne lecture des informations technologiques et typologique.

Les altérations du cuir sont principalement dues à des manipulations et un conditionnement peu adéquat car bien que cohésif, le cuir demeure fragile mécaniquement parlant.

Une partie des clous présente des altérations mettant en péril leur intégrité matérielle par la présence d'akaganéite (β -FeOOH) pouvant entraîner la destruction des clous. Ce produit de dégradation a également un impact sur le cuir. Il est certain que si les conditions de conservation restent telles quelles, la semelle se détériorera de manière irréversible entraînant par la même une forte diminution des valeurs culturelles. Car si les clous éclatent, ils perdront leur forme et leur surface d'origine qui sont des éléments essentiels dans la compréhension de l'objet et influencent donc la valeur de recherche, mais aussi la valeur esthétique par la perte de lisibilité des motifs que les clous forment.

Mais bien que la présence d'akaganéite (β -FeOOH) puisse inquiéter, il convient de relativiser. L'akaganéite (β -FeOOH) peut entraîner des dégradations très rapides des objets mais dans notre cas, au vu de l'ancienneté de l'excavation, on peut avancer que la corrosion n'a pas été rapide. Ainsi en enlevant certains des facteurs de corrosion (oxygène, HR, polluants)⁸⁹ il est probable que celle-ci soit ralentie et que les clous n'éclatent plus.

Propositions d'interventions

Dans ce travail nos interventions consistent à mettre en place des nouvelles mesures de conservation permettant de conserver les valeurs culturelles de cette semelle. Dans un tableau figurant en annexe 5, p.78 nous avons relevé les altérations pour lesquelles nous allons effectuer une intervention et quel est leur impact sur les valeurs culturelles. Ces interventions consistent en : une consolidation des zones fragiles (fissures des clous et du cuir), la réalisation d'un nouveau conditionnement et un changement des conditions climatiques. Ces différents éléments sont développés dans les parties qui suivent.

⁸⁹ Scott et Eggert, 2009, p.142

4. Reconditionnement

4.1. Objectifs du nouveau conditionnement

De par sa dégradation avancée, le conditionnement en mousse PUR plâtrée est un des facteurs mettant en danger l'objet. De plus il en limite la lisibilité (perte de valeur de recherche et perte de valeur esthétique). Un des objectifs de ce travail était donc de le remplacer et de trouver un conditionnement qui permet une meilleure conservation de l'objet sur le long terme. Il a été décidé que la semelle serait conditionnée côté fleur au-dessus, comme elle l'a été jusqu'à présent. Cette position est celle où la lecture du cloutage est la plus aisée et elle correspond à la face qui était visible lorsque la chaussure, dont fait partie cette semelle, était portée.

Au vu des éléments relevés précédemment sur l'état de l'objet, le nouveau conditionnement se doit donc de répondre aux objectifs suivants : il doit être compatible avec le cuir et les clous sur le plan physico-chimique, être stable dans le temps et doit épouser la forme du cuir et des clous pour ne pas imposer des contraintes mécaniques. Le poids devra donc reposer sur le cuir et non sur les clous. Ce dernier point est particulièrement délicat puisque la surface du cuir n'est pas égale et que les tiges des clous sont fines, dépassent toutes à des hauteurs et selon des directions différentes.

Le conditionnement doit aussi jouer le rôle de support permanent afin de limiter les gestes imprécis. La semelle doit donc être lisible et étudiable sans qu'il y ait besoin de la manipuler directement.

Enfin nous avons émis le critère que le conditionnement soit facilement réalisable et reproductible.

4.2. Transfert de la semelle

Avant de réaliser le nouveau conditionnement, une étape importante a consisté à sortir la semelle de la mousse PUR. Ne pouvant saisir la semelle à la main sans risquer de l'endommager, nous l'avons transféré en utilisant une contre-forme ajustée qui permet de retourner en évitant de manipuler directement l'objet. Comme nous ne connaissions pas l'état de la face en contact avec la mousse PUR et que nous supposons que les clous dépassaient, nous avons vite écarté l'utilisation d'une plaque qui serait placée sous l'objet pour ensuite le soulever.

Nous avons utilisé un petit matelas de bourre de polyester, sous lequel a été placée une plaque de polypropylène cannelé pour avoir un support de transfert rigide (Fig.41-42, p.43). Le tout a été recouvert de Tyvek® pour éviter l'effet velcro de la bourre de polyester. Nous avons ensuite placé le matelas sur l'objet, deux rubans en coton ont été ajoutés pour permettre le maintien fixe et le tout a été retourné.

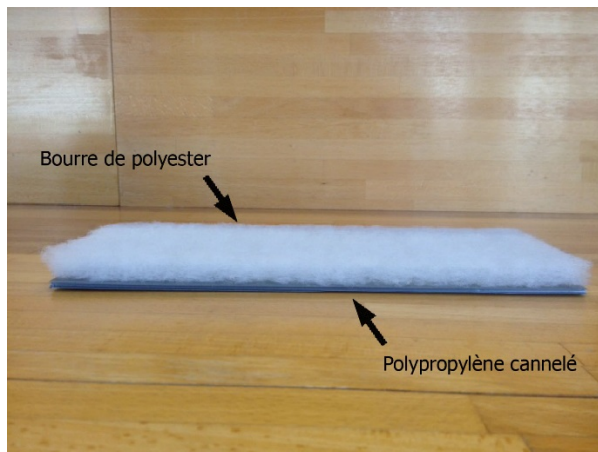


Fig. 41 : support de transfert sans Tyvek®.



Fig. 42 : semelle transférée.

Avant le transfert, nous avons effectué une consolidation des clous qui présentaient des soulèvements ainsi que des fissures du cuir.

Pour effectuer la consolidation, nous avons utilisé une résine acrylique, le Paraloid® B-72 (Méthacrylate d'éthyle copolymère) (cf annexe 6, p.79). La consolidation a été effectuée après les analyses pour ne pas rajouter un matériau aux spectres IRTF et faciliter ainsi leur interprétation.

Le choix du Paraloid® B-72 s'est fait en prenant en compte que c'est une résine dont l'adhérence est adéquate à l'intervention envisagée, qu'elle est soluble dans une large gamme de solvant et est stable chimiquement dans le temps⁹⁰. Car si des traitements de restauration ultérieurs doivent être appliqués sur les clous et le cuir, il est possible que la présence d'un adhésif/consolidant peu voir non réversible, soit problématique. La consolidation des clous ne les protégera pas de la corrosion, mais permettra de conserver les fragments le temps du conditionnement.

4.3. Support pour le long terme en composite époxy/fibres de verre

Au vu des objectifs énoncés ci-dessus, nous avons exploré différentes possibilités de conditionnement et de mise en œuvre (cf annexe 6, p.79-81). Nous nous sommes aussi renseignés sur l'utilisation du scan et de l'impression 3D. Après consultation du Fablab de Neuchâtel et selon un retour d'expérience du SMRA nous avons décidé de ne pas retenir cette option. Il est difficile d'obtenir un degré de précision permettant une contre forme ajustée aux clous qui sont proches et il faut beaucoup de temps pour obtenir un scan de l'objet⁹¹ (prise du scan et travaille sur le logiciel).

⁹⁰ Koob, 1986, p.8.

⁹¹ Fablab, 2016 [Communication orale].

Il a donc été décidé de s'inspirer d'une méthode employée au service archéologique de Berne⁹² pour le conditionnement des objets organiques archéologiques et de l'adapter à ce cas. Cette méthode consiste en le moulage de l'objet et la fabrication d'un support en composite tissus de fibres de verre/résine époxy recouvert d'un molleton de coton et d'une protection en Tyvek® (Fig. 43, p.44)⁹³.

Le support sera ainsi constitué d'un renfort (le tissu de fibres de verre) et d'une matrice (la résine époxy). Le renfort contribue à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce⁹⁴. La matrice lie les fibres, répartit les contraintes encaissées et permet d'obtenir la forme désirée⁹⁵.



Fig. 43 : éléments du support en coupe

Les fibres de verre constituent un des renforts de grande diffusion les plus utilisés. Elles sont obtenues par un mélange de silice et de divers additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore)⁹⁶. Il existe différentes géométries et textures de renforts. Nous avons opté pour un tissu de tissage sergé 2/2 (Fig.44, p.44) : il apporte une bonne résistance mécanique et permet d'épouser la forme de l'objet⁹⁷.

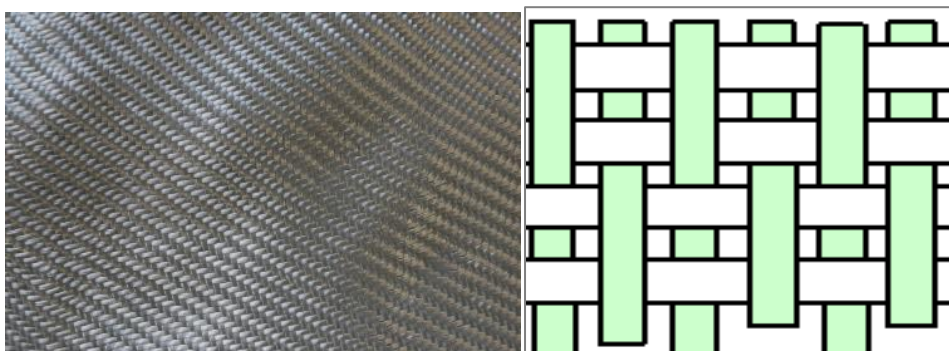


Fig. 44 : À gauche : vue du tissage du textile utilisé ©LP, HE-Arc CR. À droite : schéma d'un tissage en sergé 2/2 (CARMA, 2004 [En ligne], p.4).

⁹² Kohler, 2014 *non publié* et Klügl, 2016 [Communication orale].

⁹³ CARMA, 2004 [En ligne], p.2.

⁹⁴ Ibid, p.2.

⁹⁵ Ibid, p.9.

⁹⁶ Les fibres choisies pour ce conditionnement sont de type E, soit pour les composites de grandes diffusion et les applications courantes (Composite Solutions AG, 2015 [En ligne]).

⁹⁷ Composite Solutions AG, 2015 [En ligne].

Quant à la résine époxy, elle est utilisée fréquemment en conservation-restauration, notamment comme adhésif structurel et comme comblement. Malgré un certain jaunissement avec le temps, elle présente une bonne résistance physico-chimique dans le temps⁹⁸. Les résines époxy sont couramment utilisées dans le moulage des pièces composites car elles possèdent les avantages suivants⁹⁹ :

- Une bonne tenue mécanique, thermique et chimique.
- Un faible retrait (1 à 2 %).
- Une excellente adhérence sur les fibres de verre.
- Une mise en œuvre facile.

4.4. Réalisation du support

Afin de ne pas surcharger la lecture du présent chapitre, les détails des différentes étapes et des matériaux utilisés pour la réalisation du support sont consultables en annexe 6, p.82.

Moulage du négatif

Le temps de séchage de l'époxy étant relativement long (env. 16-20h) et afin de limiter au maximum la manipulation de la semelle, la première étape a consisté à prendre la forme en négatif de la face en contact avec le conditionnement.

Le moulage du négatif a été réalisé à l'aide de bandes plâtrées. Nous avons placé un film plastique PE sur l'objet pour ne pas être en contact direct. Les bandes plâtrées ont été appliquées en formant une gouttière en suivant le tracé des clous. Si l'empreinte des clous est prise de manière trop précise, celle-ci peut engendrer des contraintes mécaniques sur les tiges.

Le négatif réalisé était fin, afin d'effectuer le moulage du composite sur sa face externe. Si le moulage avait été fait sur la face interne, le support aurait été trop serré.

Moulage du composite

Il existe différentes modes d'application : nous avons utilisé celui du moulage au contact, qui consiste à poser le renfort imprégné sur le négatif et à le mettre en forme progressivement en évacuant les bulles d'air et en limitant les plis à l'aide d'un pinceau. Deux couches de tissu imprégné ont été posées à environ 1 heure d'intervalle pour permettre une mise en forme plus précise.

Afin d'être certains que l'époxy n'entraînerait pas de dommages liés à des composés organiques volatils (COV), nous avons respecté un temps de dégazage de 4 semaines¹⁰⁰. Le durcissement de la résine époxy est dû à une réaction de polyaddition entre résine et durcisseur et donc, en principe, ne résulte

⁹⁸ Koob, 2006, p.47-48.

⁹⁹ CARMA, 2004 [En ligne], p.11.

¹⁰⁰ Garcin, 2004 *non publié*, p.132.

pas de l'évaporation d'un solvant. Mais les produits, conditionnés sous forme liquide, ne sont pas exempts de solvants¹⁰¹.

Une fois le temps de durcissement de la résine atteint, celle-ci est découpée à la forme voulue puis les éventuelles aspérités sont polies à l'aide d'un papier de verre.

Globalement, le moulage a bien fonctionné et le support obtenu épouse les formes de la semelle, la maintient et permet d'apprécier sa finesse (Fig.45, p.46).



Fig. 45: vue de 3/4 du nouveau support avec semelle.

Ajustement du support

Néanmoins, des ajustements ont été nécessaires. Au niveau du talon, l'empreinte s'est moins bien faite qu'à l'avant et nous avons dû rajouter du molleton de coton découpé à la forme voulue pour que le talon ne repose pas sur les pointes des clous (Fig. 46, p.46).



Fig. 46 : zone du talon avant ajustement (à gauche) et après (à droite).

¹⁰¹ Garcin, 2004 *non publié*, p.132.

Nous avons aussi réalisé un autre matelas de bourre de polyester correspondant à la forme du support pour que ce dernier soit positionnable facilement si la semelle doit être retournée.

4.5. Recommandations de manipulation

Au vu de l'état mécanique fragile de l'objet, il est fortement recommandé de ne pas manipuler la semelle directement mais d'utiliser le support lorsque celle-ci doit être étudiée ou simplement déplacée. Les manipulations pour observer le côté chair doivent être réduites au strict minimum. S'il doit être observé, la semelle doit être retournée à l'aide du matelas de bourre de polyester (Fig.47-48, p.47). Afin de limiter les manipulations inadéquates, une fiche de manipulation sera disposée sur le conditionnement (cf annexe 6, fig.79, p.86)



Fig. 47 : matelas, support avec semelle et ruban en coton pour le maintien.



Fig. 48 : vue du concept pour retourner la semelle.

5. Recommandations climatiques de conservation

Comme l'a démontré le constat d'état, les clous sont l'élément instable de l'objet et par leur corrosion active, contribuent à la dégradation du cuir (fissures, dépôts, rigidification). Pour empêcher la corrosion active des métaux archéologiques excavés, la méthode la plus efficace demeure l'extraction des chlorures. Si cela ne peut être fait, une gestion climatique adaptée peut diminuer les risques de dégradation par corrosion active¹⁰².

Plusieurs études ont relevé avec précision les taux d'humidité relative (HR) auxquels les chlorures de fer et l'akaganéite (β -FeOOH) se forment et provoquent une corrosion active de l'objet. Ainsi, Thickett et Oldhya (2013) démontrent que pour arrêter la corrosion active des taux ne dépassant pas les 12 % sont recommandés¹⁰³. Cependant, Watkinson et Lewis (2005) notent que si une telle HR ne peut être obtenue, un taux le plus bas possible contribue tout de même à diminuer les risques de corrosion active et que si l'objet est fortement minéralisé, la corrosion active sera moindre¹⁰⁴.

Si une humidité relative très basse favorise la conservation des objets archéologiques ferreux, elle ne convient pas aux objets organiques et composites. Elle peut provoquer des fractures, des délaminations ainsi que des rétractions¹⁰⁵. En tant que matériau hygroscopique, le cuir établit un équilibre avec son environnement par désorption et sorption de l'humidité. Ainsi si l'HR est trop basse, les fibres du cuir se rétracteront de manière importante entraînant des déformations irréversibles.¹⁰⁶

Par conséquent, les préconisations d'HR sont presque diamétralement opposées à celles proposées pour le fer (cf tableau 4, p.49). La plupart des auteurs s'accordent pour conseiller des taux avoisinant les 50% d'HR pour le cuir.

¹⁰² Scott et Eggert, 2009, p.142.

¹⁰³ Watkinson et Lewis, 2005 et Thickett et Odlyha, 2013.

¹⁰⁴ Watkinson et Lewis, 2005, p. 250.

¹⁰⁵ Scott et Eggert, 2009, p.142.

¹⁰⁶ Florian, 2006, p.42.

Matériau	Humidité relative	Température
Fer archéologique avec chlorures de fer et akaganéite ¹⁰⁷	Chlorures de fer : 11% max. Akaganéite : 12% max.	18°C
Cuir archéologique traité par PEG 400 et lyophilisation	50% ¹⁰⁸ 45-55% ¹⁰⁹	16-18°C
Cuir archéologique avec pièces métalliques	40% ¹¹⁰ Avec absorbeur d'oxygène	16°C

Tableau 4 : comparaison de préconisations climatiques pour les alliages ferreux et le cuir.

Afin de trouver un compromis entre les sensibilités opposées du cuir et du fer nous avons décidé de suivre les préconisations pour le cuir archéologiques avec des pièces métalliques, soit : une HR de 40%. Le SMRA ayant à disposition une réserve pour les objets en métal dont l'HR est en moyenne autour des 40%, cette option est réalisable. L'objet sera donc changé de réserve.

Il est certain que ces valeurs ne sont pas optimales pour les clous, mais elles permettent tout de même un moindre mal. Un taux supérieur à 50% entraîne une corrosion très rapide des alliages ferreux alors que des taux entre 30 et 40% permettent une corrosion moins rapide (Fig. 49 p.49)¹¹¹, tout en demeurant acceptables pour le cuir.

Un conditionnement anoxique sera aussi mis en place suite à ce travail et permettra d'enlever un des facteurs de corrosion de l'alliage ferreux et de

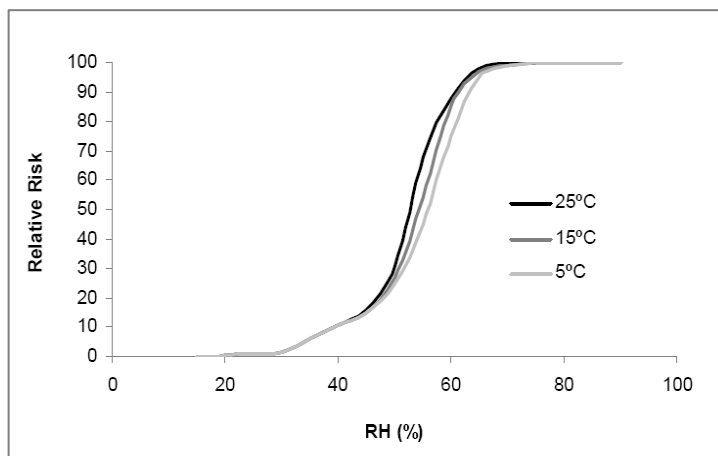


Fig. 49 : diagramme de risque de la corrosion active en fonction de l'humidité relative ©Rimmer et al., 2013 p.10.

¹⁰⁷ Watkinson et Lewis, 2005, p.249 et Thickett et Oldyha, 2013, p.112.

¹⁰⁸ Cameron et al., 2006, p. 260.

¹⁰⁹ Karsten, 2012, p.24.

¹¹⁰ Cameron et al., 2006, p. 260.

¹¹¹ Rimmer et al., 2013, p.10.

l'altération du cuir¹¹². Le SMRA possédant le matériel nécessaire à la création d'un vide partiel, le milieu anoxique est réalisable.

Néanmoins, la prédiction du comportement d'un objet reste difficilement prévisible sur le long terme et inclus donc la surveillance de l'état des clous et du cuir afin de modifier les conditions de conservation si besoin.

¹¹² Cameron et *al.*, 2006, p. 270.

6. Discussion

Les résultats obtenus au terme de ce travail nous ont permis d'acquérir de nouvelles informations sur l'objet et d'améliorer les conditions de sa conservation.

Au travers de la description et de la documentation de l'objet, nous avons pu relever des traces technologiques spécifiques à cet objet et avons pu mettre en lumière son importance culturelle. Soit une forte valeur de rareté et de recherche. Nous avons aussi relevé que l'on peut faire des liens entre la vie matérielle de l'objet et les dégradations observées. Les altérations observées sont principalement des conséquences de l'enfouissement, de la mise au jour, de la conservation et de la manipulation de l'objet.

L'approche utilisée dans ce travail pour la description des altérations a tendu à une description objective de l'état de la semelle, pourtant il importe de noter que le regard que l'on porte sur un objet reste tout de même subjectif et est influencé par notre propre expérience pour reconnaître et évaluer la dégradation. C'est pourquoi nous avons complété notre observation par des analyses IRTF. Nous avons également choisi de nous concentrer sur le diagnostic des altérations sur lesquelles nous pouvions agir et non pas d'expliquer tous les phénomènes d'altérations (notamment ceux induisant le PEG sur les métaux).

Nous avons exploré la possibilité d'utiliser d'autres méthodes complémentaires pour évaluer le degré d'altération du cuir. Mais comme nous l'avons mentionné précédemment, le séjour dans un milieu gorgé d'eau et le traitement modifient les propriétés physico-chimiques du cuir. Ainsi les méthodes que nous aurions pu employer s'avèrent peu pertinentes par le fait que les résultats peuvent être faussés et ne correspondent pas forcément à l'état de dégradation du cuir¹¹³.

Concernant le conditionnement, il a permis la mise en valeur de l'objet ainsi qu'une compatibilité et une stabilité garantissant une meilleure conservation. Mais les systèmes de prise d'empreinte et de moulage peuvent être améliorés pour obtenir une plus grande précision et mieux épouser les formes de l'objet. Bien que jugées peu pertinentes dans notre cas, il est probable que les nouvelles technologies de scannage 3D puissent aussi être une solution à l'avenir.

Finalement, concernant la présence d'akaganéite (β -FeOOH), si elle peut provoquer la destruction des clous, elle dépend également du niveau de minéralisation de l'objet. Bien que celui-ci ne soit pas évaluable sans l'apport de technique d'observation plus poussée tels qu'une radiographie sous

¹¹³ Barthez et Bonnot-Diconne, 1998 ; Bonnot-Diconne, 2016 [Communication orale] ; Malea *et al.*, 2012, p.587 ; Wallace, 1997, p.150.

rayonnements X, il est probable que les éclatements se stoppent. Toutefois, seul l'observation et la surveillance permettront d'évaluer l'efficacité des mesures de conservation mises en place.

Conclusion générale

Au vu des informations récoltées et synthétisées dans ce travail, nous avons pu répondre en grande partie aux questions énoncées préalablement. La semelle n'ayant jamais fait l'objet d'une étude documentée, les observations des traces de fabrication et des dégradations ont permis de découvrir des nouveaux aspects technologiques et de confirmer des hypothèses sur la nature de l'altération de cette semelle.

Ainsi, les traces de coutures en serpentine ainsi que la présence de restes de semelle intermédiaire se sont avérés être des informations inédites pour cet objet. Nous avons aussi pu comprendre que les clous sont les éléments instables de l'objet et contribuent à détériorer le cuir encore en bon état, par leur corrosion active provoquée notamment, par la présence d'akaganéite (β -FeOOH). Ces dégradations sont le fait de la mise au jour et de la conservation de l'objet et ont nécessités de reconsidérer les conditions de conservation.

Mais si des solutions ont été trouvées pour améliorer les conditions de conservation de la semelle, la prédiction du comportement d'un objet reste difficilement prévisible sur le long terme. Cela rappelle que le contrôle de l'état d'anciennes collections est nécessaire afin d'évaluer l'évolution des traitements appliqués et de changer les modes de conservation en conséquence (conditionnement, climat, stockage). Si la corrosion active des clous continue à entraîner une détérioration, il faudra probablement entamer une réflexion autour des traitements de stabilisation possibles.

Nous n'avons pas pu explorer cette option dans le temps et les objectifs de ce travail et sommes conscient de la complexité de la conservation et du traitement de tels objets. Malgré de nombreuses études sur le sujet, des questions demeurent encore, notamment sur les modes de stabilisation des alliages ferreux contaminés par des chlorures et indissociables de pièces organiques. Le compromis est en général le mot d'ordre lorsque de tels objets doivent être conservés. Dans le cas des objets en cuir, la tendance est à la conservation du matériau le plus rare et le plus fragile, soit le cuir. Mais comme nous l'avons vu, si les clous de chaussures font partis des corpus les plus retrouvés et sont parfois banalisés¹¹⁴, c'est leur association et leur positionnement sur la semelle qui concourt en grande partie à la rareté de l'objet. Ainsi ce qui apporte sa valeur à cet objet est également ce qui induit sa fragilité.

¹¹⁴ Volken, 2011, p.320.

Liste des références bibliographiques

Appelbaum, 2007 : Appelbaum, Barbara. *Conservation Treatment Methodology*. Butterworth-Heinemann, London, 2007.

Artefacts, 2014 [En ligne] : *Artefacts encyclopédie en ligne des petits objets archéologiques* [En ligne]. CNRS, 2014 [consulté le 15.07.2016]. <http://artefacts.mom.fr/fr/result.php?id=CLC-3001&find=CLC&pagenum=1&affmode=vign>

Aventicum, [En ligne] : *Aventicum : Histoire* [En ligne]. Site et Musée romains d'Avenches [Consulté le 26.05.2016]. <http://www.aventicum.org/index.php/fr/histoire>

Barthez et Bonnot-Diconne, 1998 : Barthez, Julien et Bonnot-Diconne, Céline. « Study of the Ageing of Waterlogged Archaeological Leather after Conservation Treatment ». In Bonnot-Diconne (ed.). *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Archaeological Materials Conference*. ARC-Nucléart, Grenoble, 1998, pp.232-237.

Bergeron et Rémillard, 1991 : Bergeron, André et Rémillard, France. *L'archéologie et la conservation. Vademecum québécois*. Les publications du Québec, Québec, 1991.

Bertholon, 2000 : Bertholon, Régis. *La limite de la surface d'origine des objets archéologiques métalliques. Caractérisation, localisation et approche des mécanismes de conservation*. Université de Paris I, Paris, 2000.

Bertholon, 2002 : Bertholon, Régis. « Proposition d'une méthode de description de la corrosion des objets métalliques archéologiques : schéma général ». In *La conservation-restauration en archéologie : urgences : problématiques et applications, actualité. Association des Restaurateurs d'Art et d'Archéologie de Formation Universitaire (ARAAFU), Cahier Technique n°9*. ARAAFU, Paris, 2002, p.56-65.

Bertholon, 2012 : Bertholon, Régis. « Documentation des valeurs culturelles : le rôle du conservateur-restaurateur ». In *Enjeux et pratiques documentaires en conservation-restauration. Perspectives pour la recherche. Association des Restaurateurs d'Art et d'Archéologie de Formation Universitaire (ARAAFU), Cahiers techniques n°19*. ARAAFU, Paris, 2012, p.11-15.

Cameron *et al.*, 2006 : Cameron, E. *et al.* « The conservation of archaeological leather ». In Kite, Marion et Thomson, Roy (éd.). *Conservation of leather and related materials*. Elsevier, Oxford, 2006, p.36-57.

CARMA, 2004 [En ligne] : Centre d'Animation Régional en Matériaux Avancés (CARMA). « Glossaire des matériaux composites ». In *Materia Tech* [En ligne]. CARMA, 2004 [Consulté le 29 juin 2016].http://www.materiatech-carma.net/html/pdf/GlossaireMateriauxComposites_CARMA.pdf

Castella, 2015 : Castella, Daniel. *Aventicum : une capitale romaine*. Association Pro-Aventico, Avenches, 2015.

Chahine et Vilmont, 1988 : Chahine, Claire et Vilmont, Léon-Bavi. « L'assèchement des objets en cuir gorgé d'eau ». In *Conservation-Restoration of leather and wood - Training of restorers, Sixth International Restorer Seminar, Veszprém, Hungary, 13-23 juillet 1987*. National Centre of Museum, Budapest, 1988, p.169 -178.

Chahine, 2005 : Chahine, Claire. *L'utilisation de l'alun dans la transformation de la peau en cuir*. Publications du Centre Jean Bérard, 2005.

Chahine, 2013 : Chahine, Claire. *Cuir et parchemin ou la métamorphose de la peau*. CNRS, Paris, 2013.

Composite Solutions AG, 2015 [En ligne] : « Catalogue 2015 ». In *Composite Solution* [En ligne]. Composite Solution AG, 2015 [Consulté le 26 juin 2016].
<http://www.compositesolutions.ch/pdf/katalog.pdf>

Cortella *et al.*, 2008 : Cortella, Laurent *et al.* « Impact du milieu d'enfouissement sur la dégradation de cuirs archéologiques gorgés d'eau et mise au point d'un protocole de consolidation ». *Techne*, 2008, n° Hors-série, p. 96-103.

de La Baume, 1990 : de La Baume, Sylvia. « Les matériaux organiques ». In Berducou, Marie Claire (coord.). *La conservation en archéologie*. Masson, Paris, 1990. p.222-270.

Degrigny et Guilminot, 1998 : Degrigny, Christian et Guilminot, Elodie. « Définition d'un traitement de conservation-restauration de composites fer/bois gorgé d'eau ». In *La conservation-restauration en archéologie : objets composites, traces et prélèvements*. Journées des restaurateurs en archéologie organisées par l'Atelier de conservation-restauration du musée

départemental Arles antique et la société a-corros, 16 et 17 octobre 2014, Arles, p.5-10. Cahier technique n° 5.

Florian, 2006 : Florian, Mary-Lou. « The mechanism in deterioration of leather ». In Kite, Marion et Thomson, Roy (éd.). *Conservation of leather and related materials*. Elsevier, Oxford, 2006, p.36-57.

Garcin, 2004 non publié : Garcin, Emmanuelle. *Conception d'un mannequin de conservation pour la mise en réserve et l'exposition*. Mémoire de fin d'étude, Institut National du Patrimoine (INP), Paris, septembre 2004, non publié.

Graham et Karsten, 2011 : Graham, Karla et Karsten, Angela. *Leather drying trial. A comparative study to evaluate different treatment and drying techniques for wet archaeological leather*. Research report series no. 70-2011, English Heritage, London, 2011.

Illes, 2004 : Illes, Véronique. *Guide de manipulation des collections*. Somogy éditions d'art, Paris, 2004.

IRTF, 2013 [En ligne] : Biophyresearch. « Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF) » In *Biophysearch* [En ligne]. Biophysearch, 2014 [Consulté le 24.07.2016]. <http://www.biophyresearch.com/wp-content/uploads/2013/04/Document-technique-FTIR-v01.pdf>

Karsten et al., 2012 : Karsten, Angela et al. *Waterlogged organic artefacts. Guidelines on their Recovery, Analysis and Conservation*. English Heritage, Swindon, 2012.

Kohler, 2014 non publié : Kohler, Kevin. *Herrstellungskonzept für ein Torsionsstabiles, passgenaues Epoxiharz/Glasfaser Laminat*. Praktikum, Archäologischer Dienst des Kantons Bern, 2014, non publié.

Koob, 1986 : Koob, Stephen.P. « The use of Paraloid B-72 as an Adhesive : Its Application for Archaeological Ceramics and Other Materials ». *Studies in Conservation*, volume 31, numéro 1, février 1986, p. 7-14.

Koob, 2006 : Koob, Stephen.P. *Conservation and care of glass objects*. Archetype Publications, London, 2006. p.40-48.

Larsen *et al.*, 1996 : Larsen, René *et al.* « Fibre Assessment ». In *Environnement Leather Project, Deterioration and Conservation of Vegetable Tanned Leather*, Research Report N°6, 1996, p.113-120.

Le trésor de la langue française informatisé, [En ligne] : Le trésor de la langue française informatisé [En ligne]. Analyse et traitement informatique de la langue française (ATILF) [Consulté le 21 juillet 2016]. <http://atilf.atilf.fr/dendien/scripts/tlfiv5/showp.exe?100;s=3576354600;p=combi.htm>

Leguilloux, 2004 : Leguilloux, Martine. *Le cuir et la pelleterie à l'époque romaine*. Editions Errance, Paris 2004.

Malea *et al.*, 2012 : Malea, Ekaterini *et al.* "Assessing the physical condition of waterlogged archaeological leather". In Straetkvern, Kristiane et Williams Emily (éd.). *Proceedings of the 11th ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference, Greenville, 2010*. ICOM Committee for Conservation, Working Group on Wet Organic Archaeological Materials, Bremerhaven, 2012, pp.571-593.

Morlat-Therias *et al.*, 2008 : Morlat-Therias, Sandrine *et al.* «Comportement à long terme de polymères de consolidation hydrosolubles». *Techné*, 2008, Hors-série, p.53-59.

NPS Museum Handbook, 2001 [En ligne] : National Park and Service (NPS). « Appendix I : Curatorial Care of Archeological Objects ». In *NPS Museum Handbook, Part I: Museum Collections* [En ligne]. NPS, 2001 [Consulté le 20 mai 2016]. <https://www.nps.gov/museum/publications/MHI/AppendI.pdf>

Pellezzi, 2012 [en ligne] : Pellezzi, Eleonora. « Etude du vieillissement des mousses de polyuréthane ester et consolidation par les aminoalkylalkoxysilanes ». Thèse de doctorat. Université d'Evry Val d'Essonne, 14 décembre 2012 [consulté le 26 février 2016]. <http://www.biblio.univ-evry.fr/theses/2012/2012EVRY0034.pdf>

Reguer, 2005 : Reguer, Solenn. *Phases chlorées sur les objets archéologiques ferreux corrodés dans les sols : caractérisation et mécanismes de formation*. Thèse de doctorat. Université Paris-Sud-Paris XI, 2005

Rimmer *et al.*, 2013 : Rimmer, Melanie *et al.* *Guidelines for the Storage and Display of Archaeological Metal Work*. English Heritage, Swindon, 2013.

Scott et Eggert, 2009 : Scott David.A et Eggert, Gerhard. *Iron and steel in art. Corrosion, colorants, conservation*. Archetype Publications Ltd., London, 2009.

Selwyn et al., 1999 : Selwyn, Lyndsie et al. « The Corrosion of Excavated Archaeological Iron with Details on Weeping and Akaganéite ». *Studies in Conservation*, volume 44, numéro 4, 1999, p. 217-232.

Selwyn, 2004 : Selwyn, Lyndsie. Métaux et corrosion : un manuel pour le professionnel de la conservation. Institut canadien de conservation (ICC), Ottawa, 2004.

Thickett et Odlyha, 2013 : Thickett, D. et Odlyha. M. « The Formation and Transformation of Akaganéite ». In *Metal 2013, Interim Meeting of the ICOM-CC Metal Working Group, 16th-20th september 2013, Edinburg, Scotland*. ICOM-CC, Edinburg, 2013, pp.107-113.

Thomson, 2006 : Thomson, Roy. « Testing leather and related material ». In Kite, Marion et Thomson, Roy (éd.). *Conservation of leather and related materials*. Elsevier, Oxford, 2006, p.58-65.

Tse, 2007 : Tse, Season. « Lignes directrices pour la mesure du pH en conservation ». Bulletin technique n°28. Institut canadien de conservation, Ottawa, 2007.

Volken, 2011 : Volken Marquita et al. "Les clous de chaussures du site de Pfyngut: les bases d'une typo-chronologie." In Paccolat Olivier (dir.). *Pfyn/Finges, évolution d'un terroir de la plaine du Rhône. Le site archéologique de "Pfyngut" (Valais, Suisse)*. Cahiers d'archéologie romande 121, Archaeologia Vallesiana 4, Lausanne, 2011, p.315-388.

Volken, 2005 : Volken, Marquita. *Le cuir archéologique romain*. Mémoire de licence, Université de Lausanne, 26 septembre 2005, *non publié*.

Volken, 2007 : Volken, Marquita. « Le fer et la peau : le cuir et ses outils en milieu urbain ». In: Chardon-Picault Pascale (dir.). *Aspects de l'artisanat en milieu urbain: Gaule et Occident romain, Actes du colloque international d'Autun, 20-22 septembre 2007*. Revue Archéologique de l'Est, 28e supplément, RAE, Dijon, 2010, p.415-424.

Wallace, 1997 : Wallace, Amanda. « Scanning Electron Microscopy and Fibre Shrinkage Temperature Analysis of Archaeological Waterlogged Leather ». In Hoffmann, Per (ed.). *Proceedings of the*

6th ICOM-CC Working Group on Wet Archaeological Materials Conference, York, 9-13 september 1996. ICOM, Bremerhaven, 1997, p.135-151.

Watkinson et Lewis, 2005 : Watkinson, David et Lewis, T. Mark. « Desiccated Storage of Chloride-Contaminated Archaeological Iron Objects ». *Studies in Conservation*, vol. 50, n°4, 2005, p.241-252.

Liste des communications orales et écrites¹¹⁵

Bonnot-Diconne, 2016 [Communication orale] : Bonnot-Diconne, Céline. Conservatrice-restauratrice d'objets en cuir, entretien téléphonique concernant les cuirs archéologiques, juin 2016.

Brambilla, 2016 [Communication orale] : Brambilla, Laura. Adjointe scientifique à la Haute Ecole Arc CR, entretien oral pour la réalisation de la IRTF, juin 2016.

Castella, 2016 [Communication écrite] : Castella, Daniel. Archéologue et responsable des publications au SMRA, échange de mail concernant le contexte de fouille, juillet 2016.

Cuendet, 2016 [Communication orale] : Cuendet, David. Conservateur-restaurateur au Musée Cantonal D'archéologie et d'Histoire, Lausanne, entretien oral concernant le traitement des objets archéologiques organiques, avril 2016.

Fablab, 2016 [Communication orale] : Fablab. Entretien concernant la faisabilité d'un scan 3D pour la réalisation du conditionnement, mai 2016.

Klügl, 2016 [Communication orale] : Klügl, Johanna. Conservatrice-restauratrice d'objets archéologiques organiques, service archéologique du canton de Berne, juin 2016.

Volken, 2016 [Communication orale] : Volken, Marquita. Calcéologue et archéologue, entretien oral concernant la fabrication des chaussures romaines et visite de l'atelier Gentle Craft, mai 2016.

¹¹⁵ En annexe 7, tableau 9, p.89, figure le détail des contacts effectués.

Glossaire

Clouoire : outils pour réaliser les clous avec trou et forme arrondie. La tige est placée dans un trou et les épaules sont martelées contre l'arrondi pour former la tête du clou¹¹⁶.

Couture en serpentine : points en zigzag caractérisés par une grande largeur de piqûre.

Enclume-pied (*forma calcei*) : pour réaliser des chaussures le cordonnier utilisait une *forma*. Soit une pièce de bois, de pierre ou de métal présentant la forme d'un pied. Celle pour assembler le semelage par cloutage était en métal¹¹⁷.

Faciès de corrosion : « Ensemble des caractères relatifs aux altérations physico-chimiques des matériaux constitutifs d'un objet (ou d'une partie d'un objet). Un faciès de corrosion peut présenter une seule forme de corrosion ou plusieurs »¹¹⁸.

Limite de la surface d'origine : limite correspondant à la forme de l'objet lors de son abandon. Cette limite peut être déplacée de son emplacement d'origine¹¹⁹.

Tanin végétal : « Substance organique contenue dans de nombreux végétaux, notamment dans les écorces et les bois (chêne, châtaignier, acacia, québracho), les racines (bruyère, badan), les feuilles (sumac, gambier), les fruits et gousses (myrobolam, acacia), les galles tannantes (noix de galle du chêne), les sucs et les gommes (kino), et qui est utilisée à des usages divers notamment dans le tannage des peaux »¹²⁰.

Tannage à l'alun : « Le tannage à l'alun est le plus ancien des tannages minéraux. L'alun classique des tanneurs est le sulfate double d'aluminium et de potassium, de formule $Al_2(SO_4)_3, K_2SO_4, 24H_2O$ ¹²¹. »

Tannage : « Traiter les peaux brutes de certains animaux en pratiquant sur elles un certain nombre d'opérations de tannage pour les transformer en cuirs souples et imputrescibles »¹²².

¹¹⁶ Volken, 2011, p.316.

¹¹⁷ Leguilloux, 2004, p.69.

¹¹⁸ Bertholon, 2002, p.65.

¹¹⁹ Bertholon, 2000, p.218.

¹²⁰ Le trésor de la langue française [En ligne].

¹²¹ Chahine, 2005, p.28.

¹²² Le trésor de la langue française [En ligne].

Liste des figures

Fig. 1 : reconstitution de la ville d'Aventicum (en haut) et du canal menant au lac de Morat (en bas) ©Aventicum-SMRA.	9
Fig. 2 : reconstitution du secteur amont du canal ©Aventicum-SMRA.	9
Figure 3 : fouille en cours du canal navigable (1990) ©Aventicum-SMRA.	10
Figure 4 : vue de la semelle lors de sa découverte ©Aventicum-SMRA.	10
Fig. 5: face externe correspondant au côté fleur du cuir et dimensions principales.	10
Fig. 6: vue de côté de la tranche avec dimension maximale et minimale de l'épaisseur.	11
Fig. 7: face interne correspondant au côté chair du cuir.	11
Fig. 8 : dénominations de quelques parties et dimensions moyenne pour les clous.	11
Fig. 9 : trois types de semelage© Volken, 2005, p.37. :	12
Fig. 10 : vue des différentes parties d'une chaussure avec semelage de type 3. © Leguilloux, 2004, p.122.	12
Fig. 11 : morceau présumé de semelle intermédiaire (en blanc)	13
Fig. 12 : vue des trous à espacement régulier sous lumière rasante (en blanc).....	14
Fig. 13 : trou de couture en serpentine (x 0.17) (en blanc).	14
Fig. 14: dessin d'après une stèle funéraire : un cordonnier enfonce les clous dans la semelle placée sur l'enclume pied. La semelle est maintenue sur l'enclume par une sangle que le cordonnier tend avec son pied © Volken, 2007, p.420.	15
Fig. 15: la section carrée de la tige ainsi que la forme recourbée en hameçon sont visibles sur la tige de ce clou (x 0.37).	15
Fig. 16 : structure en éclaté d'une fibre de cuir©SCITEC Nutrition.....	17
Fig. 17 : semelle sur le conditionnement plâtré en mousse PUR.....	19
Fig. 18 : conditionnement en mousse PUR sans la semelle.	19
Fig. 19: fissures du talon côté fleur.	21
Fig. 20 : fissures du talon côté chair.	21
Fig. 21 : vue d'ensemble de l'usure du	22
Fig. 22 : vue agrandie de l'usure de la couche papillaire laissant apercevoir la couche réticulaire sous- jacente dont les fibres sont plus épaisses (x1.38)	22
Fig. 23 : fibres avant test (x 0.66)	23
Fig. 24 : fibres après test (x 0.66)	23
Fig. 25 : prélèvement de cuir analysé par IRTF-ATR	23
Fig. 26 : Spectre FTIR-ATR de fibres de cuir montrant une concordance avec un PEG (1456 cm ⁻¹ , 1350 cm ⁻¹ , 1300 cm ⁻¹ , 1250 cm ⁻¹ , 833 cm ⁻¹) et un pic à 1018 cm ⁻¹ correspondant à un silicate (en noir).	24
Fig. 27 : Localisation des altérations physico-chimiques sur les clous.	27
Fig. 28: types de strates et codification principale ©Bertholon, 2002, p. 58.....	28

Fig. 29 : zones d'éclat permettant d'apercevoir la stratigraphie.....	29
Fig. 30 : stratigraphie des produits de corrosion (S: Sédiment ; D: Dépôts ; CP : Produits de corrosion ; M : Métal)	29
Fig. 31: localisation du prélèvement de CP1.	32
Fig. 32: détail de la zone de prélèvement de CP1.	32
Fig. 33 : spectre IRTF-ATR permettant l'identification de la strate CP 1.....	32
Fig. 34 : localisation du prélèvement de la strate CP 4.	33
Fig. 35 : détail de la strate CP 4.	33
Fig. 36: spectres IRTF-ATR permettant l'identification de la strate CP 4. Il y aussi présence de sidérite (1356 cm ⁻¹ , 856 cm ⁻¹ et 732 cm ⁻¹). Cette dernière constitue certainement la couche CP 3.1 prélevée par inadvertance.	33
Fig. 37 : Reconstitution de deux semelles dont celle de gauche a été portée. Les clous sont usés ainsi que la surface du cuir au niveau de la pointe ©Volken, 2016.	35
Fig. 38 : vue sous lumière rasante de la face côté fleur.....	35
Fig. 39 : spectre IRTF-ATR d'un exsudat (CP 5). Du fait de la présence d'un mélange, le composé est difficilement identifiable. Il y a présence de traces de PEG et d'akaganéite (β -FeOOH).....	38
Fig. 40 : semelle en l'état (à gauche) et lors de sa découverte (à droite). Le talon n'est pas fragmenté et quelques clous en plus sont présents (en blanc).	40
Fig. 41 : support de transfert sans Tyvek®.	43
Fig. 42 : semelle transférée.....	43
Fig. 43 : éléments du support en coupe	44
Fig. 44 : À gauche : vue du tissage du textile utilisé ©LP, HE-Arc CR. À droite : schéma d'un tissage en sergé 2/2 (CARMA, 2004 [En ligne], p.4).....	44
Fig. 45: vue de 3/4 du nouveau support avec semelle.....	46
Fig. 46 : zone du talon avant ajustement (à gauche) et après (à droite).	46
Fig. 47 : matelas, support avec semelle et ruban en coton pour le maintien.	47
Fig. 48 : vue du concept pour retourner la semelle.	47
Fig. 49 : diagramme de risque de la corrosion active en fonction de l'humidité relative ©Rimmer et al., 2013 p.10.	49
Fig. 51: « Plan schématique du secteur compris entre la ville antique et le lac de Morat ©Aventicum-SMRA.....	63
Figure 52 : numérotation des clous. Les clous 102 et 103 étaient tombés dans la mousse à côté de l'objet.	64
Fig. 53 : dénomination des différentes parties de la semelle.....	64
Fig. 54 : motifs de cloutage similaire (en rouge)	65
Fig. 55: motif de cloutage similaire (en rouge).	66
Fig. 56: aperçu des styles de chaussure romaine ©Leguilloux, 2004, p.109.....	67
Fig. 57: coupe stratigraphique de la peau©Chahine, 2013, p.17.....	68
Fig. 58 : côté fleur de la semelle	68
Fig. 59 : côté chair de la semelle.	68

Fig. 60: localisation des prises d'échantillons sur la semelle	71
Fig. 61: Microscope Thermo Scientific Nicolet iN 10® ©Labmate-online.	71
Fig. 62 : dépôts côté chair vers la pointe.	76
Fig. 63 : dépôts côté chair vers la voute plantaire.	76
Fig. 64 : dépôts de PEG sur clou (en blanc) (x 0.66)	76
Fig. 65 : dépôts de mousse PUR (en blanc) (x 0.66)	76
Fig. 66 : dépôt PEG et minéraux sur fibres (x 2.5)	76
Fig. 67 : dépôts de minéraux sur fibres (x 2.5)	76
Fig. 68 : dépôts produits de corrosion orange sur cuir	77
Fig. 69 : dépôts produits de corrosion bleu sur cuir	77
Fig. 70 : exsudats sortant d'une fissure (x 1.1).	77
Fig. 71 : exsudat sous un éclat (x 0.55).	77
Fig. 72: schéma du conditionnement pour les textiles archéologiques ©NPS	80
Fig. 73: négatif recouvert de film PE	83
Fig. 74: zone pour imbiber le tissu	84
Fig. 75: placage du moulage à l'aide d'un pinceau.	84
Fig. 76: finition au papier ponce	85
Fig. 77: aspect final avec molleton et Tyvek®	85
Fig. 78 : fiche de transfert de la semelle.	86

Liste des tableaux

Tableau 1 : relevé des altérations physico-chimiques type.....	26
Tableau 2 : légende de la stratigraphie	31
Tableau 3 : résultats des mesures de pH.....	39
Tableau 4 : comparaison de préconisations climatiques pour les alliages ferreux et le cuir.	49
Tableau 5 : synthèse des propositions d'intervention en fonction du diagnostic des altérations.....	78
Tableau 6 : comparaison des conditionnements selon les objectifs établis (vert : convient ; orange : moyen ; rouge : ne convient pas).	81
Tableau 7: résumé des propriétés des matériaux utilisés pour le support en laminé fibres de verre/époxy.	81
Tableau 8 : détails des principaux matériaux utilisés et coûts.	88
Tableau 9 : synthèse des entretiens par contact	91

Annexes

Annexe 1 : Présentation de l'objet

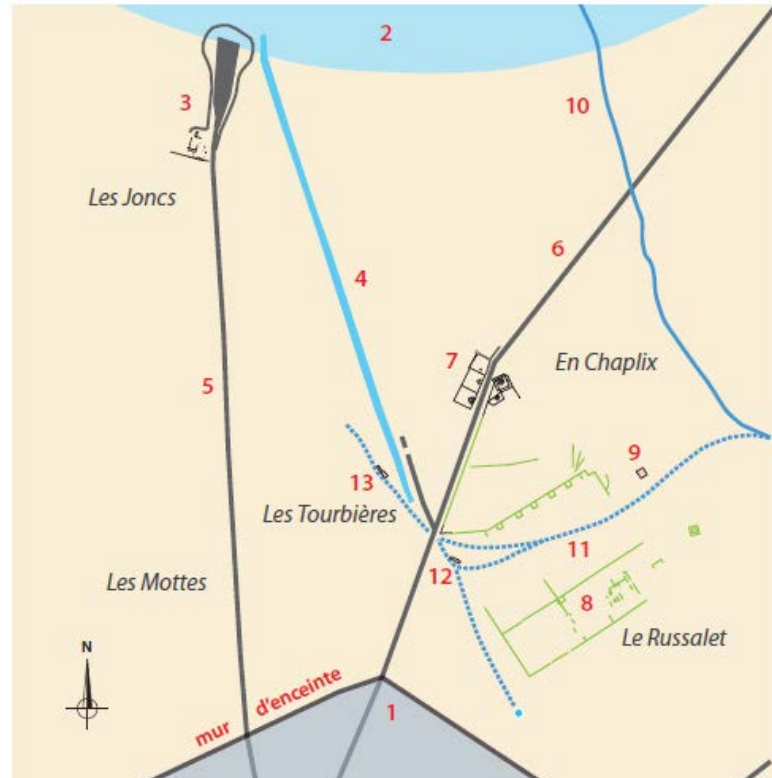


Fig. 50: « Plan schématique du secteur compris entre la ville antique et le lac de Morat ©Aventicum-SMRA

1 Ville antique

2 Lac antique

3 Port

4 Canal

5 Route du port

6 Route du Nord-Est

7 Ensemble culturel et funéraire d'En Chaplix

Chaplix

8 Villa suburbaine

9 Atelier de tuiliers

10 Chandon (cours actuel de la rivière)

11 Anciens cours du Chandon

12 Moulin hydraulique d'En Chaplix

13 Moulin hydraulique des Tourbières

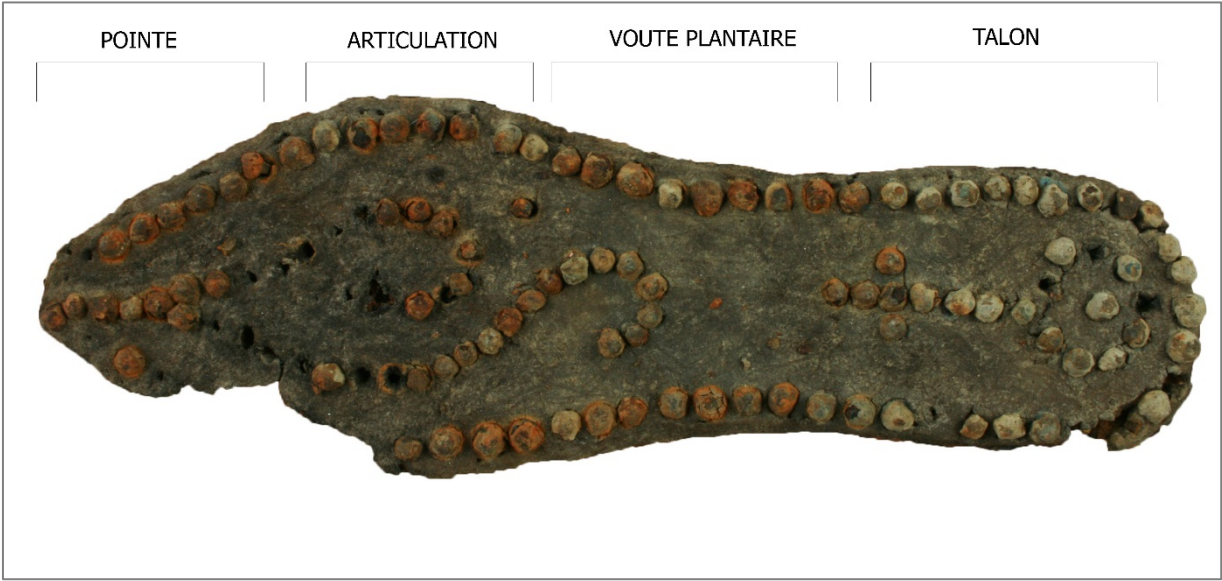


Figure 51 : dénomination des différentes parties de la semelle



Fig. 52 : numérotation des clous. Les clous 102 et 103 étaient tombés dans la mousse à côté de l'objet.

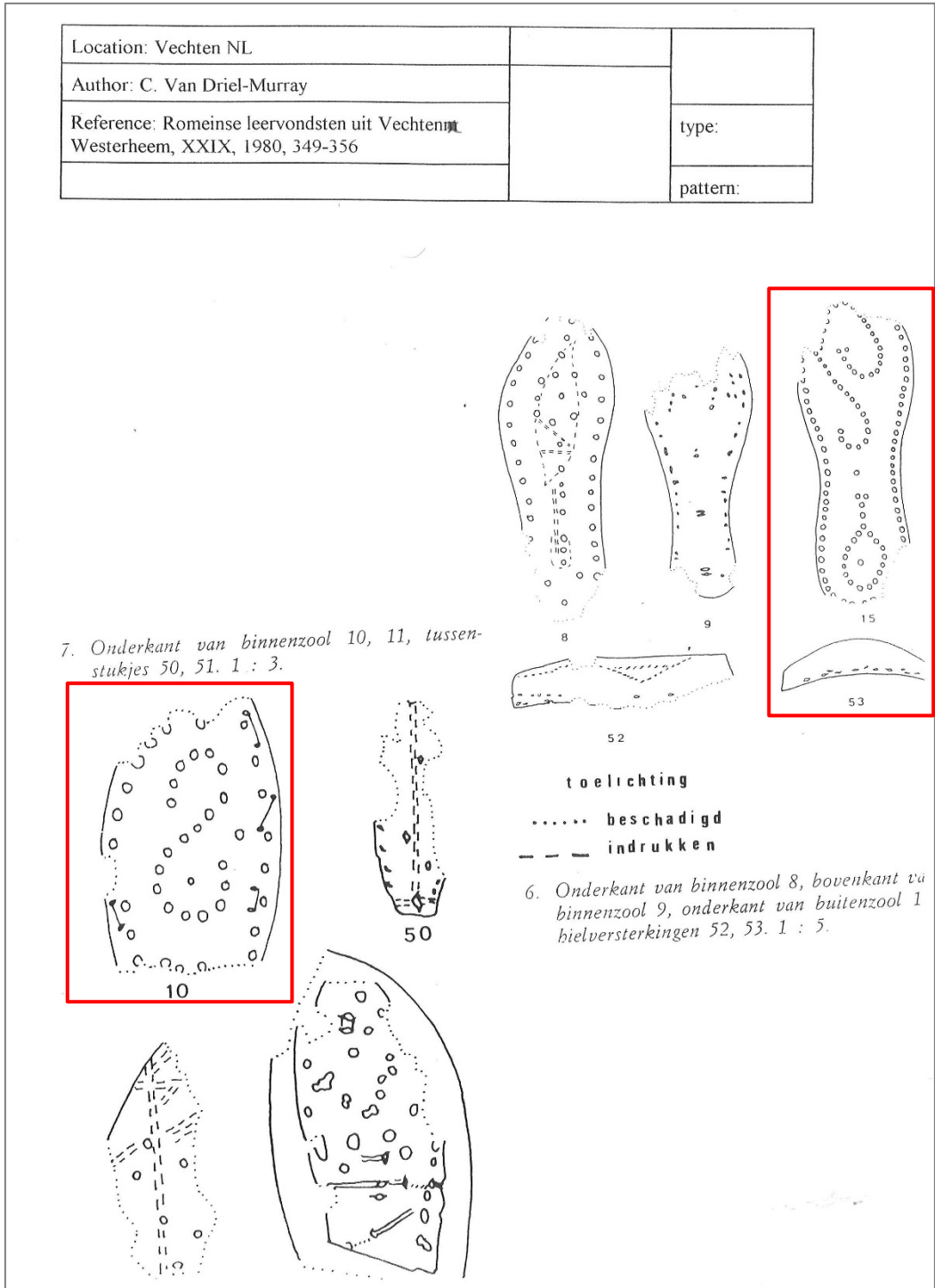


Fig. 53 : motifs de cloutage similaire (en rouge)

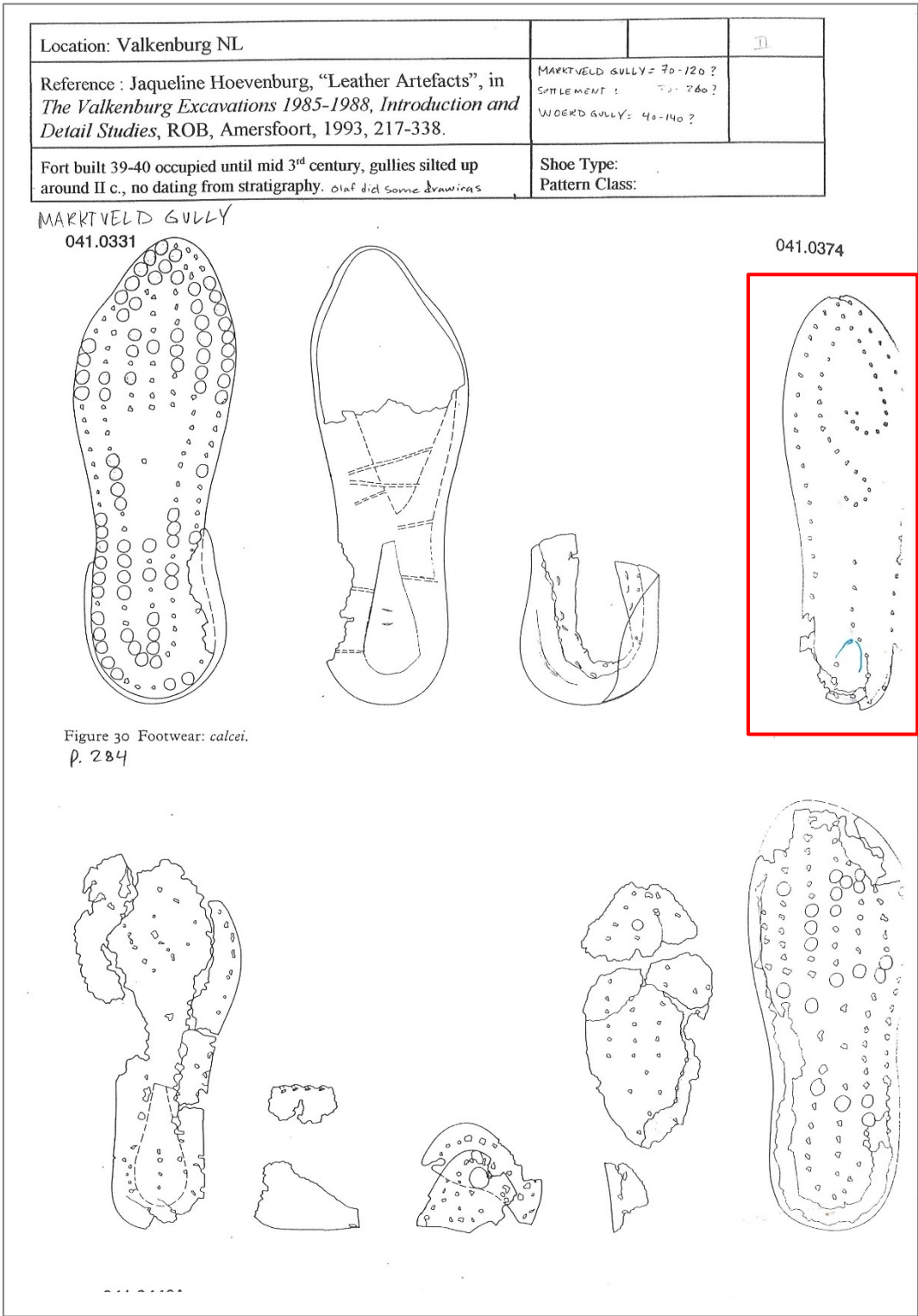


Fig. 54: motif de cloutage similaire (en rouge).

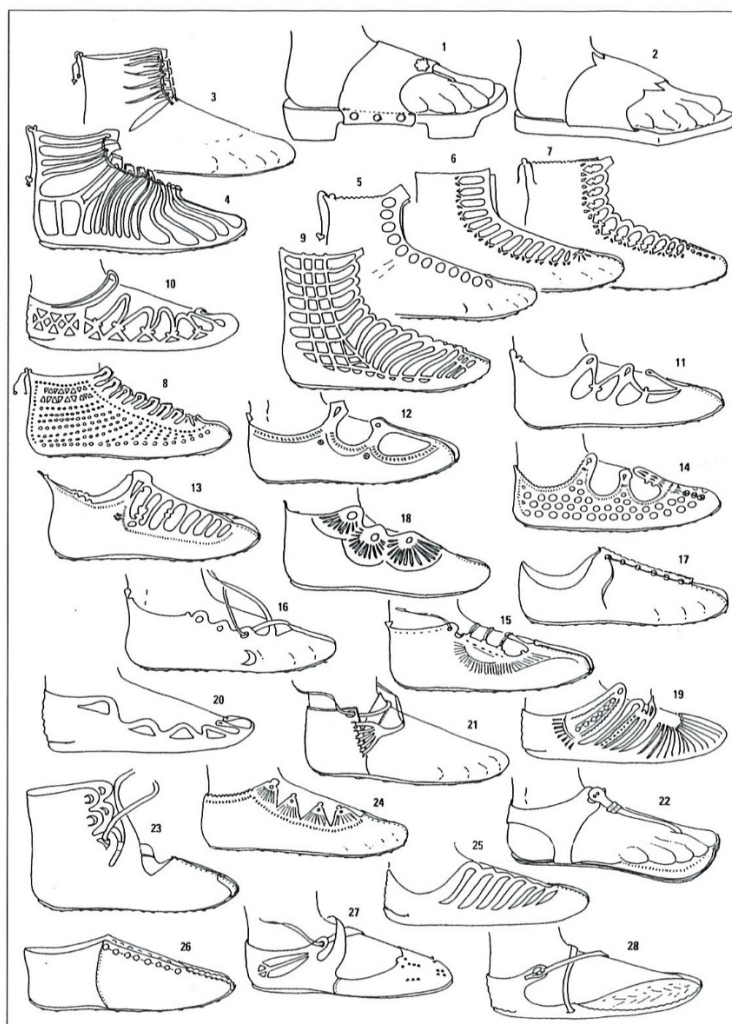


Fig. 55: aperçu des styles de chaussure romaine ©Leguilloux, 2004, p.109.

Structure du derme

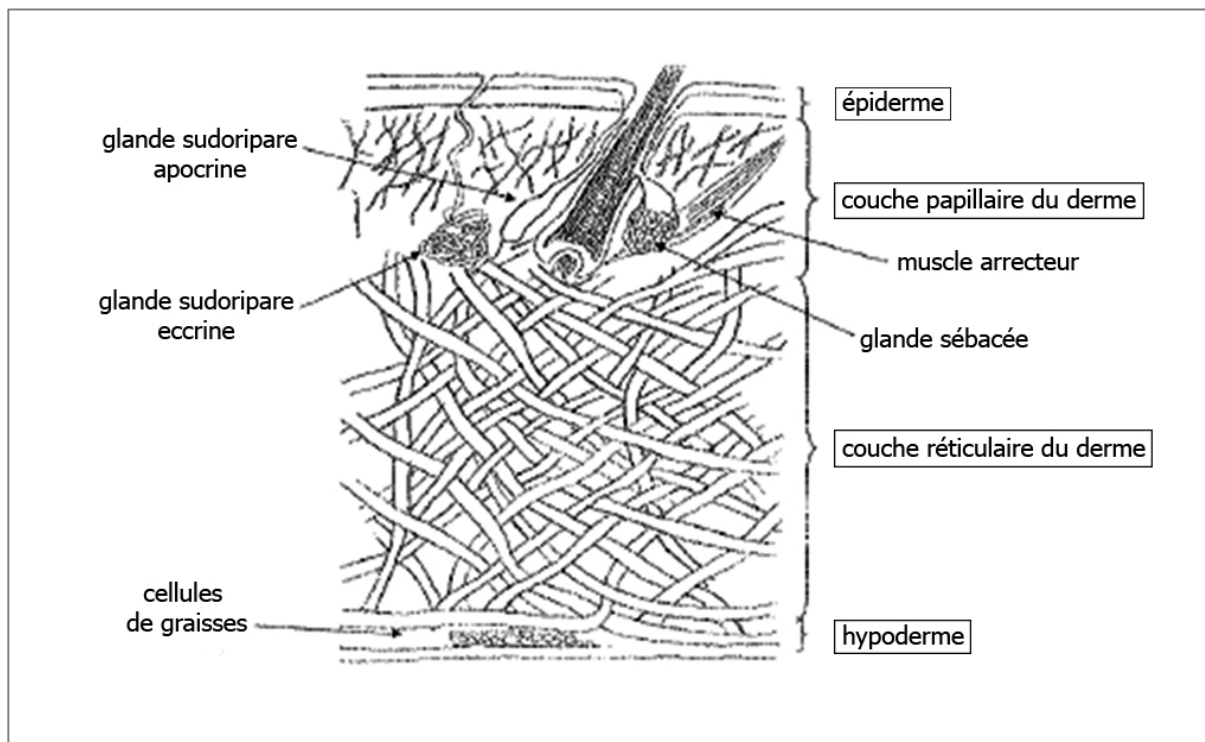


Fig. 56: coupe stratigraphique de la peau ©Chahine, 2013, p. 17.

Le derme est constitué de deux parties. La couche papillaire correspond au côté fleur (Fig.57, p.68) : les fibres la composant sont fines, disposées verticalement par rapport à la surface de la peau et s'entrelacent en fin réseau. La couche réticulaire correspond au côté chair (Fig.58, p.68) : le réseau de fibres est plus volumineux et les fibres s'entrelacent à un angle plus faible que le côté fleur¹²³.

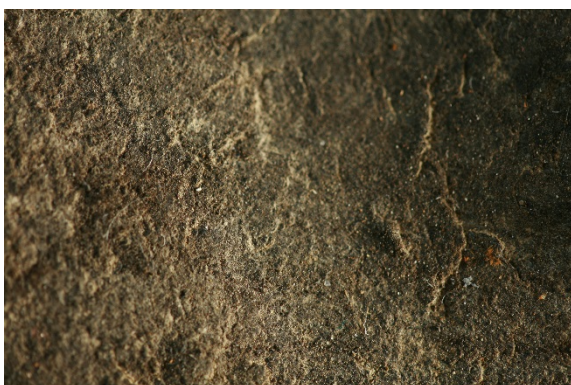


Fig. 57 : côté fleur de la semelle



Fig. 58 : côté chair de la semelle.

¹²³ Chahine, 2013, p.19.

Annexe 2 : Rapports de travail

Musée Romain Avenches		Laboratoire de conservation	
Rapport de travail L1990.048		N° d'inv. ou K : 90/07823-22	
Objet semelle en cuir avec clous en bronze		Provenance / N° Fouille En Chaplix canal Fouille 1990.08	
Dimensions et/ou Nombre de fragments		Matériau CUIR	
Photos num : dias : ORG CUIR 1990/544-551		Plans, dessins	Date/sign.

État de l'objet à la réception :
 Prélèvement sur le terrain, gorgé d'eau, entier, avec le sédiment


Interventions:
 Nettoyage à l'eau déminéralisé et conditionnement dans un support synthétique
 une grillage fine formable dans l'eau chaud, (utilisé en médecine pour les bandages rigides)

Transport au laboratoire de conservation-restauration du Musée d'archéologie de Neuchâtel
 (Beat Hug) pour lyophilisation

Travail effectué par André Glauser

Stockage, conditionnement:
 Après conservation au dépôt du MRA

Labo MRA / 90_07823-22__L1990.048__semelle en cuir__RT.doc / Créé le 28/01/14
1 / 1

MUSÉE CANTONAL D'ARCHÉOLOGIE – NEUCHÂTEL		LABORATOIRE
N°:	ANCIEN N°:	OBJET:
1 - chaus sout	FOUILLE: 90/7823-13	semelle en cuir avec des clous
ILLUSTRATION:	PHOTO N°:	
		
ÉTAT AVANT LE TRAITEMENT:		
POIDS: geringigt auf Kunststoffumbringer		
TRAITEMENT:		
DATE:	Illegible:	TRAVAIL:
20.9.90		→ Neuchâtel, Glances
21.9.90		→ PEG 400/30%
15.10.90		aus Bad, Gipsdeckel → Langel
16.10.90	810	lyph
15.10.90	1715	126.7 + Langel
22.10.90	90m	lyph
26.10.90	17	130.0 hoch
16.11.90		→ Glances

Annexe 3 : Détail et procédure des analyses

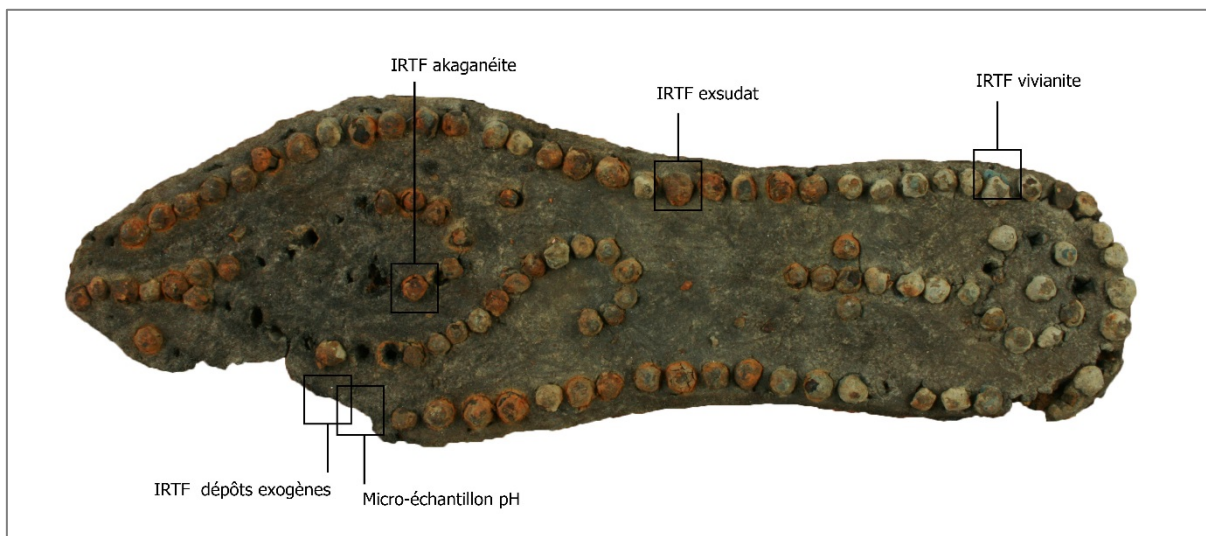


Fig. 59: localisation des prises d'échantillons sur la semelle

Protocole d'analyse par IRTF

Principe

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé¹²⁴. L'analyse s'effectue par l'envoi d'un rayonnement infrarouge et par la mesure des longueurs d'ondes absorbées par le matériau ainsi que l'intensité de l'absorption. Ainsi, pour un matériau de composition et de structure donnée, correspondra des bandes d'absorption caractéristiques (spectre de référence) qui permettront d'identifier le matériau. Les matériaux analysés peuvent être de nature organique ou inorganique et peuvent être détectés sous différentes formes (solide, liquide, gazeux)¹²⁵.



Fig. 60: Microscope Thermo Scientific Nicolet iN 10® ©Labmate-online.

¹²⁴ IRTF, 2013 [En ligne], p.1

¹²⁵ Ibid, p.2.

Cependant toutes les vibrations n'aboutissent pas à une absorption, cela dépendra de la géométrie de la molécule. Une analyse Raman peut permettre une meilleure détection de certains groupements et peut s'avérer complémentaire à la IRTF¹²⁶.

Objectif

Identification de trois produits de corrosion et caractérisation de dépôts exogènes présents sur les fibres de cuir.

Condition opératoire

Réalisé à la Haute Ecole Arc de Neuchâtel, le 16 juin 2016, par Laura Brambilla.

Matériel utilisé

Prélèvement :

- Scalpel neuf ou nettoyé à l'éthanol
- Loupe binoculaire
- Gants d'examen à usage unique

Analyse

- Microscope Thermo Scientific Nicolet iN 10[®] avec cristal de germanium.
- Plaque de verre nettoyé à l'éthanol
- Echantillon

Interprétation des résultats

- Logiciel OMNIC Picta™

Déroulement

1. Le prélèvement est effectué sous loupe binoculaire avec un scalpel
2. Le prélèvement est placé dans l'emplacement correspondant sur la plaquette de verre

¹²⁶ IRTF, 2013 [En ligne], p.1 et Brambilla, 2016 [Communication orale].

3. La plaquette est positionnée sur la machine
4. L'analyseur est nettoyé à l'aide d'éthanol puis placé sur la machine
5. La machine est remplie d'azote
6. Le prélèvement est pointé à l'aide du microscope
7. L'analyse est réalisée
8. L'interprétation des spectres obtenus est faite par Laura Brambilla

Protocole de mesure du pH par micro-échantillonnage

Principe et choix de la méthode

Il existe différentes méthodes pour obtenir la mesure du pH. La plupart sont basées sur l'extraction de substances solubles dans l'eau en utilisant différents dispositifs. Les principes fondamentaux et les méthodes assurant la fiabilité et la reproductibilité des résultats de telles mesures figurent en général dans des normes. Pour ce travail, nous avons consulté et pris en compte la **norme AFNOR NF ISO 4045, datée d'avril 2008**, ainsi que des recommandations faites pour la mesure du pH en milieu patrimonial éditées par l'Institut Canadien de Conservation (ICC)¹²⁷.

Dans le cas de mesure du pH sur des objets patrimoniaux, il est important de prendre en compte que cette dernière se fait par extraction des ions solubles dans l'eau, qui est un processus irréversible. L'extraction peut se faire par prélèvement ou directement sur l'objet¹²⁸. La méthode s'effectuant directement sur l'objet a été jugée peu adaptée dans notre cas, car elle doit se faire en présence d'eau, entraînerait la formation d'auréoles sur l'objet et provoquerait une modification du substrat à une échelle microscopique en modifiant le milieu interne du matériau¹²⁹. Nous avons donc opté pour une mesure par prélèvement d'échantillon.

Bien que le suivi des normes permette une plus grande fiabilité, elles doivent être adaptées au milieu patrimonial. En effet, dans notre cas, la quantité d'échantillon recommandée s'élevant à 5g pour 100ml nous avons suivi la méthode de micro-échantillonnage. Celle-ci propose un ratio échantillon/eau de 1/50 (g/ml) et permet de limiter la prise d'échantillon¹³⁰.

Objectif de la mesure

Evaluer le degré d'acidité du cuir.

¹²⁷ Tse, 2007.

¹²⁸ Ibid, p.2.

¹²⁹ Ibid, 2007, p.2.

¹³⁰ Ibid, 2007, p.13.

Condition opératoire

Réalisé à la Haute Ecole Arc de Neuchâtel par Line Pedersen, le 10 juin 2016.

Matériel utilisé

- Prélèvement : scalpel, éprouvette en verre récemment ébouillantée et propre.
- Eau distillée de qualité 3 conformément à la norme ISO 3696.
- Récipient en verre récemment ébouillanté et adapté à la taille de l'échantillon et à large ouverture.
- Agitateur magnétique
- pH-mètre de type électrode en verre à extrémité plane Modèle Piccolo® (HI 98111)
- Eprouvette en verre à large ouverture ébouillantée et propre.
- Propipette graduée (1 ml)
- Balance précise au 0.00 g

Déroulement

1. Calibration du pH-mètre à l'aide de solutions tampons à 4 et 10 pH
2. Mesure du pH de l'eau distillée
3. Rinçage de l'électrode à l'eau distillée
4. Choix d'une zone de prélèvement correspondant à la prise d'échantillon voulu
5. Prélèvement de l'échantillon avec un scalpel neuf et pesée de 0.03 g
6. Noter et documenter la zone de prélèvement
7. Broyé l'échantillon à l'aide de la lame du scalpel
8. L'échantillon est placé dans une pipette en verre propre
9. Ajout de 1.5 ml d'eau distillée
10. Agitation à la main durant 30s, de manière à mouiller uniformément la zone d'échantillon
11. Agitation magnétique durant 1 heure à 50 tours minutes
12. Laisser reposer et décanter l'échantillon environs 45 min (les fibres de cuir se déposent dans le fond)
13. Oter l'agitateur mécanique
14. Prélever la phase liquide à l'aide d'une pipette
15. Placer la phase liquide dans l'éprouvette à large ouverture
16. Mesure du pH à l'aide d'une électrode à extrémité plane. Attention à ce que l'électrode ne touche pas le fond de l'éprouvette mais reste sur le haut de la goutte.
17. Attendre la stabilisation de la donnée mesurée.
18. Noter la mesure.

Annexe 4 : Documentation des altérations

Référentiel pour le test de friabilité

Notation du degré de friabilité¹³¹ :

1. Fibres très cohérente : présence de poudre seulement due à l'échantillonnage. Les fibres restent entières.
2. Fibres cohérentes avec légère poussière et présence de poudre et de petits fragments
3. Fibres modérément cohérente avec degré équivalent de poussière et de fibres.
4. Fibres peu cohérente avec beaucoup de poussière.
5. Fibres pas cohérentes avec pratiquement que de la poussière.

Les fibres avec une notation 1 sont dans un bon état physique et celles avec une notation 5 ont atteint un degré de désintégration important.

¹³¹ Larsen, 1996, p.114.

Photographies des altérations



Fig. 61 : dépôts côté chair vers la pointe.



Fig. 62 : dépôts côté chair vers la voute plantaire.



Fig. 63 : dépôts de PEG sur clou (en blanc) (x 0.66)



Fig. 64 : dépôts de mousse PUR (en blanc) (x 0.66)

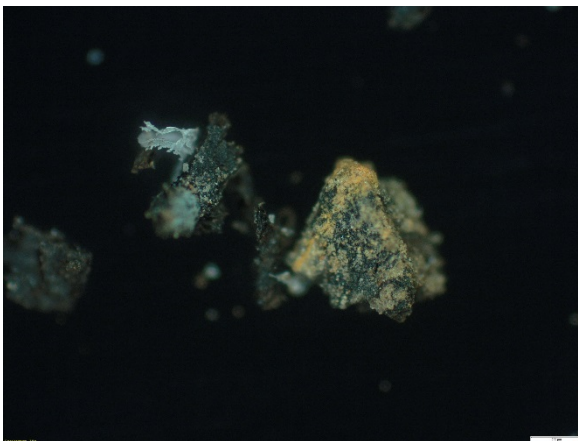


Fig. 65 : dépôt PEG et minéraux sur fibres (x 2.5)

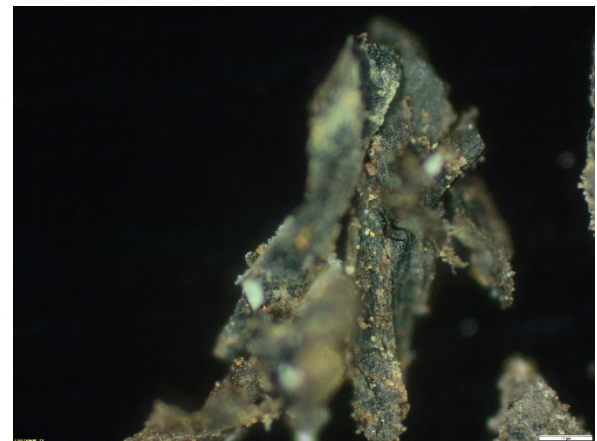


Fig. 66 : dépôts de minéraux sur fibres (x 2.5)



Fig. 67 : dépôts produits de corrosion orange sur cuir



Fig. 68 : dépôts produits de corrosion bleu sur cuir



Fig. 69 : exsudats sortant d'une fissure (x 1.1).



Fig. 70 : exsudat sous un éclat (x 0.55).

Annexe 5 : Propositions d'interventions

Altération	Impact sur les valeurs culturelles	Intervention envisagée	Impact de l'intervention sur les valeurs culturelles
Corrosion active des clous entraînant une perte de matière et un dépôt sur les fibres	Perte des informations contenues dans la limite de la surface d'origine des clous : Diminue la valeur de rareté, de recherche et esthétique	Changement des conditions climatiques (HR 40% ; T°16) Consolidation des clous	Préserve les valeurs culturelles : Ralentissement de la corrosion active. Limite la perte de matière durant le conditionnement
Fissuration du cuir	Peut entraîner une fragmentation conduisant à une perte de matière et une diminution de la lisibilité : Diminue la valeur de rareté, de recherche et esthétique	Consolidation avec Paraloid®B72	Limite la perte de matière durant le conditionnement
Dégradation du conditionnement : - Maintiens mécaniques insuffisant, abrasif - Dégagement de COV	Facteurs de dégradation physico-chimique des clous et du cuir : diminue la valeur de rareté et de recherche. Diminue la manipulation donc la valeur de recherche Diminue la lisibilité et impact la valeur esthétique	Changement du conditionnement et mise en place d'un concept pour retourner la semelle	Préserve les valeurs culturelles : Compatibilité physico-chimique et mécanique Mise en valeur esthétique Manipulations pour étude possible par le support (dans une certaine mesure)

Tableau 5 : synthèse des propositions d'intervention en fonction du diagnostic des altérations

Annexe 6 : Reconditionnement

Protocole de consolidation

- Consolidation des clous : Paraloid® B-72 (Méthacrylate d'éthyle copolymère) à 20 % dans de l'acétone.
- Collage des fragments de cuir : Paraloid® B-72 à 40% dans de l'acétone.
- Consolidation des zones fissurées du cuir : Paraloid® B-72 à 30 % dans de l'acétone.

Comparaison de conditionnements

Concept N° 1 : «Passgenaues Epoxiharz/Glasfaser Laminat» inspiré du service d'archéologie de Berne

Concept utilisant un textile de fibres de verre imprégné de résine époxy. Permet d'obtenir un support qui épouse relativement bien la forme de l'objet. Est recouvert d'un molleton de coton et d'une crêpeline de soie.

La fibre de verre et la résine époxy présentent une bonne stabilité physico-chimique dans le temps et ont déjà été étudiées et appliquées dans le cadre d'utilisation dans le domaine du patrimoine¹³². Le molleton de coton permet d'obtenir un matelassage qui limite les contraintes mécaniques liés à la dureté du treillis en fibres de verre imprégné d'époxy. Il est compatible d'un point de vue physico-chimique et stable dans le temps¹³³.

La soie a une bonne résistance mécanique et n'a pas un effet velcro sur les fibres. Cependant, le service archéologique du canton de Berne a effectué un test d'Oddy sur l'ensemble des matériaux de conservation qu'ils utilisent et la crêpeline de soie a échoué au test¹³⁴.

Néanmoins en remplaçant la soie par du Tyvek®, le support devient approprié d'un point de vue physico-chimique.

¹³² Garcin, 2004 *non publié*.

¹³³ Illes, 2004, p.99.

¹³⁴ Klügl, 2016 [Communication écrite].

Concept N°2 : portfolio en carton non-acide avec fenêtre en crêpeline de soie et mousse PE

Le service national des parcs (National Park Service - NPS) aux Etats-Unis propose dans un note-book¹³⁵ un conditionnement en portfolio pour les textiles archéologiques (Fig.71 , p.80). Ce système permet de voir l'objet sans ouvrir le conditionnement et peut permettre de voir les 2 côtés en ouvrant le portfolio d'un côté ou de l'autre. Par contre, il ne permet pas forcément un bon maintien si l'objet est fin.

Concernant les matériaux, le carton non-acide et la mousse PE sont reconnus et attestés comme stable dans le temps et compatibles chimiquement¹³⁶.

Comme mentionné précédemment, la crêpeline de soie est quant à elle sujette à des doutes concernant sa stabilité avec les objets du patrimoine.

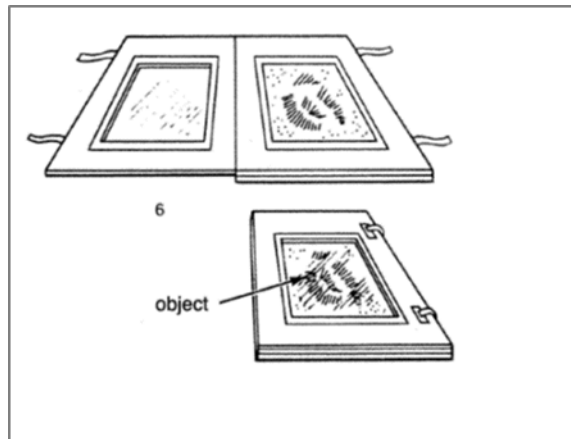


Fig. 71: schéma du conditionnement pour les textiles archéologiques ©NPS

Concept n°3 : mousse PE creusée en contre forme avec revêtement en molleton de coton et Ty Wek®

Taille d'une mousse polyéthylène haute densité (PEHD) en contre forme et recouverte de Tyvek® pour ne pas qu'il y ait d'effet abrasif sur les clous et le cuir.

Le façonnage de la mousse à la main peut rendre le conditionnement moins bien ajusté à la forme de l'objet et provoquer des contraintes mécaniques.

La compatibilité des matériaux est quant à elle assurée.

¹³⁵ NPS Museum Handbook, 2001 [En ligne], p.14.

¹³⁶ Illes, 2004, p.99.

Concept	Manipulation sûre	Pas de contraintes mécaniques	Compatibilité physico-chimique	Ajusté à la forme de l'objet	Stable dans le temps	Pas de polluants
N°1 Avec Tyvek®						
N°2						
N°3						

Tableau 6 : comparaison des conditionnements selon les objectifs établis (vert : convient ; orange : moyen ; rouge : ne convient pas).



Propriétés des matériaux utilisés¹³⁷


Type	Stabilité physique	Stabilité chimique	Absorption de l'humidité	Capacité antichoc
Molleton de coton	Très bonne	Très bonne	Importante	Bonne si épaisseur suffisante
Non tissé Tyvek textile (PE)	Très bonne	Très bonne	Nulle	Mauvaise
Fibres de verre/résine époxy	Bonne	Très bonne	Nulle	Moyenne (la résine époxy est fragile mécaniquement mais la fibre de verre la renforce)



Tableau 7: résumé des propriétés des matériaux utilisés pour le support en laminé fibres de verre/époxy.



¹³⁷ Information obtenues pour le Tyvek et le molleton de coton dans : Illes, 2004, p.99-100. Pour la fibre de verre/résine époxy dans : CARMA, 2004 [En ligne], p.12.

Etapes de la réalisation du laminé époxy/fibres de verre

Etape 1 : Moulage du négatif en plâtre		
Matériel nécessaire	Action	Illustration
Bandes plâtrées Ciseaux	Découper les bandes plâtrées à la bonne dimension	 <p><i>Fig. 72 : bandes de plâtre</i></p>
Film plastique PE Bandes plâtrées préalablement découpées Récipient Eau	<p>Placer le film plastique sur l'objet</p> <p>Imbiber d'eau les bandes plâtrées et les positionner sur l'objet en les faisant légèrement se superposer.</p> <p>Suivre délicatement la forme du cloutage pour obtenir un moulage ajusté.</p> <p>Appliquer deux couches de bandes en tournant de 90° la deuxième couche.</p> <p>Bien lisser <u>mais s'en appuyer.</u></p>	 <p><i>Fig. 73 : moulage du négatif</i></p>
	Laisser prendre durant une ½ journée.	

Etape 2 : Moulage du laminé époxy/fibres de verre		
Matériel nécessaire	Action	Illustration
<p>Tissus de fibre de verre</p> <p>Ciseaux</p>	<p>Préparer deux pièces de tissus en fibres de verre un plus large que la forme voulue.</p> <p>Découper de manière à obtenir un positionnement de la trame décalé de 90° entre les deux pièces.</p>	
<p>Plateau</p> <p>Vaseline</p> <p>Film PE</p>	<p>Protéger un plateau avec du film PE et y positionner le négatif.</p> <p>Appliquer au pinceau de la vaseline sur le plâtre pour que le film y adhère. Le recouvrir de film PE.</p> <p>Placer l'objet sous une hotte aspirante ou une chapelle et porter un masque à solvant si cela ne peut être fait.</p>	 <p><i>Fig. 74: négatif recouvert de film PE</i></p>

<p>Gants</p> <p>Araldit[®] 20/20 (XW 396/ Härter XW 397)</p> <p>Pièces de tissus préalablement découpée</p> <p>Pinceau à bout plat</p>	<p>Préparer une dose suffisante d'Araldite[®] 20/20 selon le ratio (30mg/10.5mg)</p> <p>Sur un film plastique PE, imbibé le tissu d'Araldite[®] 20/20.</p> <p>Saisir le tissu à l'aide de pincettes et le placer sur le négatif.</p> <p>A l'aide d'un pinceau, plaquer le composite sur le négatif.</p> <p>Chasser les bulles d'air vers l'extérieur et aplanir les plis.</p> <p>Après une heure, appliquer le deuxième tissu imbibé.</p> <p>Répéter l'opération de placage.</p>	 <p><i>Fig. 75: zone pour imbiber le tissu</i></p>  <p><i>Fig. 76: placage du moulage à l'aide d'un pinceau.</i></p>
	<p>Laisser sécher le moulage sous la hotte ou la chapelle durant au moins 24 heures.</p>	

<p>Masque 3M FFP 1</p> <p>Cutter ou ciseau</p> <p>Papier ponce pour le métal</p>	<p>Retirer délicatement le moulage.</p> <p>Retirer le film PE.</p> <p>Découper à l'aide d'un cutter ou d'un ciseau à la forme voulue et poncer les aspérités à l'aide d'un papier ponce (Porter un masque pour se protéger de la poussière).</p>	 <p><i>Fig. 77: finition au papier ponce</i></p>
<p>Molleton de coton</p>	<p>Découper une pièce de molleton de coton et de Tyvek® à la forme voulue.</p> <p>Appliquer quelques points de colle d'amidon sur le molleton puis, appliquer sur le moulage en plaquant bien</p> <p>Répéter l'opération avec le Tyvek®. Attention à ne pas appliquer trop de colle pour ne durcir le molleton et le Tyvek®.</p> <p>Laisser sécher.</p>	 <p><i>Fig. 78: aspect final avec molleton et Tyvek®</i></p>
	<p><u>Temps nécessaire à la réalisation en comptant les temps de séchage :</u></p> <p>3 jours</p>	

Protocole de transfert

MANIPULER UNIQUEMENT AVEC LE SUPPORT

1. Poser le matelas sur le support BORDS CONTRE BORDS



2. Attacher les rubans sur le côté en serrant DOUCEMENT



3. Retourner avec les DEUX MAINS



4. Détacher les rubans et soulever DELICATEMENT le support



5. Pour replacer la semelle dans son support, recommencer l'opération à 1 en veillant à poser le support de manière ajustée sur le matelas

Fig. 79 : fiche de transfert de la semelle.

Détails des matériaux et fournisseurs

Matériaux	Caractéristiques techniques	Fournisseur	Prix à l'unité	Prix de la quantité nécessaire (estimation)
Bandes plâtrées	Plâtre de Paris Coton	Gerstaecker Schweiz AG Gallusstrasse 81 4600 Olten Schweiz Telephone: +41 (0) 62 20 - 60 000 Telefax: +41 (0) 62 20 - 60 003 E-Mail: info@gerstaecker.ch	4.40 CHF /8cm x 4m	0.5 CHF
Molleton de coton	Non teinté, 100% coton	Créasphère AG Textiles Ambiance SA textiles et tissus rue de Neuchâtel 34 CH-2034 Peseux/NE Téléphone + 4132 730 58 30 Fax : + 4132 731 33 76 Lien : www.creasphere.com	5.00 CHF/m	Env. 2 CHF
Résine époxy Araldite [®] 20/20 (XW 396/ Härter XW 397)	Voir fiche technique : http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/1387/0900766b81387c0d.pdf Produit No. 97920	Kremer Pigmente GmbH & Co. KG Hauptstr. 41 – 47 DE-88317 Aichstetten Tel + 49 7565 91448-0 Fax + 49 7565 1606 Email: info@kremer-pigmente.de	83.06 EUR pour 1 pack	20 CHF

Tissu de fibre de verre	Matériau : verre Densité : 280 g/m ² Tissage : sergé 2/2 Epaisseur : 0.35 mm N° de produit : 211282.010	Composite Solutions AG Freiburgstrasse 251 CH-3018 Bern Telephone +41 31 688 40 40 Fax +41 31 688 40 41 info@compositesolutions.ch	6.20 CHF /m ¹	3.10 CHF
Tyvek [®]	Matériau : Non tissé de polyéthylène haute densité (HDPE) Résistant à l'eau, imputrescible et antibactérien. Grammage : 43 g/m ² .	Atlantis France 1 avenue Louison Bobet FR-94120 Fontenay-sous-Bois	65.13 CHF (60.00 €)/25x1524 cm	Env. 2 CHF
			Prix total de revient arrondi : 30 CHF	

Tableau 8 : détails des principaux matériaux utilisés et coûts.

Annexe 7 : Synthèse des entretiens et des échanges de courriel

Institution Profession	Nom, Prénom	Date et mode de contact	Questions	Résumé des réponses
Laténium Conservateurs- restaurateurs (CR)	Cevey, Christian Breniard Munier, Joelle	Echange de mail (20.03.2016)	Conditionnement cuir archéo ? Traitement de la semelle en 1990 ?	Pas d'expérience avec cuir archéo. Conseillent de contacter J.Klügl. Fiche de traitement de 1990.
Service d'archéologie du canton de Berne CR objets- organiques archéologiques	Klügl, Johanna	Echange de mail (20.05.2016) (31.05.2016)	Evaluation état cuir archéo ? Conditionnement ? Consolidation cuir ?	pH peut être intéressant pour dégradation PEG. Exemple conditionnement époxy/fibres de verre et portfolio. Consolidation ponctuelle avec Paraloid® B-72.
Musée d'archéologie et d'histoire, Lausanne Responsable CR	Cuendet, David	Communication orale (21.04.2016) Echange de mails	Traitement cuir archéo avec alliage ferreux ? Objets similaires ? Conditionnement ?	Favorise le cuir dans le traitement. Utilise des anticorrosifs (Hostacor®). Pas de semelle entière sur Vaud à part Avenches.

2CRC - Centre de Conservation et de Restauration du Cuir. CR des objets en cuir	Bonnot Diconne, Céline	Entretien téléphonique (01.06.2016)	<p>Quelles méthodes pour évaluer dégradation cuir ?</p> <p>Impact PEG et lyophilisation sur cuir ?</p> <p>Traitement cuir archéo avec alliage ferreux ?</p>	<p>MEB, T° de rétractation apporte des informations pouvant être contradictoires. L'état du cuir peut varier au sein d'un même objet et est modifié par l'enfouissement et le traitement.</p> <p>Si HR descend, risque de rétractation surtout pour objet assemblés ou en volume. Semelle plate, pas de contraintes, déformations moindres.</p> <p>Lyophilisation est positive pour cuir mais PEG 400 n'a pas un bon pouvoir consolidant.</p>
--	------------------------	-------------------------------------	---	---

Shoe museum, Lausanne Calcéologue et archéologue	Volken, Marquita	Communication orale (10.05.2016)	Technologie ? Trous présents sur le côté sont traces technologiques ? Peut-on déterminer type de chaussure ?	Explication concernant la fabrication. Les trous sont des traces de coutures en serpentine. Normalement pas semelle cloutée. Pas possible de déterminer type de chaussures. En Suisse, semelle avec clou en bon état sont rares. Vindonissa surtout des tentes.
Site et Musée romain d'Avenches, archéologue et responsable des publications	Castella, Daniel	Echange de mail (01.07.2016)	Offrande ? Type de terrain ? Autres objets avec ?	Dans les couches de comblements du canal avec déchets divers. Ne pense pas que c'était une offrande.

Tableau 9 : synthèse des entretiens par contact